



中国科协学会学术部 编

新

观点新学说学术沙龙文集

34

高能天体物理中的热点问题



中国科学技术出版社

新观点新学说学术沙龙文集③④

高能天体物理中的热点问题

中国科协学会学术部 编

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

高能天体物理中的热点问题/中国科协学会学术部编.
—北京:中国科学技术出版社,2010.1
(新观点新学说学术沙龙文集;34)
ISBN 978-7-5046-5026-9

I. ①高… II. ①中… III. ①高能天体物理学—研究
IV. ①P14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 017340 号

本社图书贴有防伪标志,未贴为盗版

中国科学技术出版社出版
北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码:100081
电话:010-62173865 传真:010-62179148
<http://www.kjpbooks.com.cn>
科学普及出版社发行部发行
北京市迪鑫印刷厂印刷

*

开本:787 毫米×1092 毫米 1/16 印张:10.5 字数:200 千字
2010 年 3 月第 1 版 2010 年 3 月第 1 次印刷
印数:1-2000 册 定价:18.00 元

主 编：冯长根
总 策 划：沈爱民 杨文志
专题主持：张 力 黄润乾
策 划：刘兴平 赵崇海

科学的本质是批判，交流的本质是质疑。新观点新学说学术沙龙系列活动旨在充分发挥学术交流作为原始创新的源头之一的作用，弘扬“敢于创新、勇于竞争和宽容失败的精神”，倡导自由探究，鼓励学术争鸣，活跃学术氛围，为科学家萌芽时期尚未获得主流认可的学术观点、理论以及灵感提供交流平台。该活动由中国科协学会学术部举办。

倡导自由探究

鼓励学术争鸣

活跃学术氛围

促进原始创新

序 言

由中国科协学会学术部主办,云南省科协、云南大学、中科院云南天文台联合承办的第34期新观点新学说学术沙龙于2009年7月18~19日在昆明举行。本届沙龙的主题是“高能天体物理中的热点问题”,参加沙龙研讨的有来自中科院高能物理所、北京大学等国内著名科研院所和高校的30余位专家学者,就当天体物理领域中的热点和前沿问题进行了充分的交流和探讨,使学术界对高能天体物理中的相关热点问题有了更深入的认识。

高能天体物理研究的是发生在宇宙天体上的高能现象和高能过程,涉及高能粒子的产生、加速、传播等。发生在这些天体上的高能物理过程不可能在地球上的实验室中实现,但所观测到的现象为人们研究极端条件下的物理过程提供了条件。近十几年来,随着地面大气切仑科夫探测器及空间X射线、伽玛射线探测器的不断投入使用,高能天体物理的研究有了飞速发展,特别是2008年Fermi伽玛射线空间望远镜成功升空,为将来的伽玛射线天文学的发展提供了极好的机遇。

目前,国内从事高能天体物理研究的科研人员较少,整体队伍相对薄弱,而当前又是国际高能天体物理研究飞速发展的重要时期。以“高能天体物理中的热点问题”为主题举办新观点新学说学术沙龙,通过中国科协的学术交流平台,汇聚国内相关领域的优秀人才,对高能天体物理中的前沿热点问题进行深入探讨,对于加强该领域学者之间的相互交流,促进新思想、新理论、新方法的产生和重大科学理论、科学方法的自主创新,对于加快青年创新型后备人才的培养,打破“科学的沉寂”,推动我国高能天体物理科学研究的发展,具有十分重要的意义。

本届沙龙邀请到中科院高能物理所、国家天文台、云南天文台及北京大学、中国科技大学、南京大学、广西大学和云南大学等科研院所和高等院校从事恒

星物理、活动星系核、黑洞物理、伽玛射线暴、脉冲星及脉冲星风云、宇宙线起源等不同学科方向的专家学者约 30 人参加了沙龙讨论。沙龙安排了 21 个主题发言,分别就恒星物理中存在的主要问题,伽玛射线暴、活动星系核及脉冲星等致密天体中高能辐射的起源和粒子之间的相互作用,黑洞物理、宇宙线起源等天体物理中的热点问题进行了研讨;此外,还对我国的地面和空间望远镜的优势及特色进行了讨论,包括世界上观测光谱效率最高的大天区面积多目标光纤光谱望远镜(LAMOST)对类星体的光谱观测及巡天计划、正在建设中的世界最大的射电望远镜 FAST 对脉冲星的可能探测以及我国第一颗空间天文卫星—硬 X 射线调制望远镜(HXMT)的进展及将开展的工作等。

会议期间,来自不同研究领域和研究方向的专家学者们进行了充分的讨论和争辩,从不同的视角和立场对天体物理中的热点问题进行了交流,对如何解决相关物理问题提出了较好的建议和意见,对不同学科之间应如何开展合作研究提出了很好的建议。沙龙学术气氛活跃,学者们在宽松、自由、平等的氛围中对相关学术问题进行了广泛、深入的讨论,对高能天体物理中的相关热点问题有了进一步的认识。

全体与会学者对中国科协学会学术部搭建高水平的学术交流平台、对云南省科协领导对举办本期学术沙龙所给予的高度重视和大力支持表示衷心的感谢,一致认为此举将极大地促进我国天体物理领域科学研究的革命性突破和发展。

张 力 黄润乾

2009 年 7 月

目 录

双星演化中的两个问题	韩占文(2)
恒星物理中值得研究的问题	黄润乾(9)
致密天体研究的几个问题	韩金林(16)
关于活动星系核中心黑洞质量估计的系统偏差及其修正	袁为民(20)
脉冲星:基础研究与战略应用	徐仁新(27)
毫秒射电脉冲星的一种新的形成机制	李向东(34)
脉冲星磁层中波的传播效应	王 陈(44)
伽玛射线脉冲星高能辐射模型的几个问题	张 力(48)
伽玛暴的中心引擎	袁业飞(52)
对 Birkhoff 定理的理解、引力透镜的计算问题、物质向黑洞的 塌缩问题、“冻结星”问题、史瓦西度规的奇异性问题	张双南(58)
光变曲线 RMS 与光子流量	宋黎明(70)
黑洞吸积盘中心的热核燃烧与核合成	彭秋和(78)
伽玛暴中 X 辐射物理起源的多样性	梁思维(82)
伽玛射线暴的高能光子和粒子辐射	王祥玉(86)
AGN 的高能伽玛辐射机制问题	白金明(96)

太阳活动区物理的基本问题和有关理论模型在黑洞

吸集盘喷流研究中的应用	林 隽(99)
LAMOST 类星体研究	吴学兵(113)
暗物质研究和电子超出及其解释	毕效军(122)
时变观测应成为中国高能天体物理观测研究的主要发展	
方向之一	卢方军(127)
X 射线双星中 SPL 态的 X 射线起源问题	王建成(135)
Blazars 中的对产生过程	王建民(139)
专家简介	(146)
部分媒体报道	(155)



会议时间

2009 年 7 月 17 日 上午 8:30 ~ 12:00

会议地点

昆明连云宾馆礼堂西四厅

主持人

张 力

张 力:

中国科协第 34 期新观点新学说学术沙龙现在开始,本次学术沙龙的主题是高能天体物理中的热点问题。主要针对发生在宇宙天体上的物理现象和物理过程进行研讨,对恒星物理、活动星系核、伽玛射线暴、脉冲星及超新星遗迹、暗物质等天体物理中的重大热点问题进行广泛深入的交流。通过中国科协的学术交流平台,汇聚国内相关领域的优秀人才,加强专家学者之间的相互交流,共同推动我国高能天体物理及恒星物理科学研究的发展。

双星演化中的两个问题

◎韩占文

我的报告主要是讨论双星演化中的两个问题。这次沙龙的主题是高能天体物理中的热点问题,我主要是研究恒星的,好像和高能没有多大关系,但是实际上还是有很大关系。因为恒星演化可以产生很多高能天体,比如伽玛暴、X射线双星、中子星等。我们的研究内容在高能天体物理中属于比较基础的方面。下面介绍双星演化中的一些热点问题,当然这也是一些很传统的问题。

我们知道,在天空中,大多数恒星都是成双成对的,比较极端点说,天空中近100%的恒星是双星,说得比较科学点,双星中会发生相互作用的大约占30%。双星演化可以产生非常多的有趣的天体,其中的一些产生高能辐射。从双星演化的简单示意图我们可以看到,双星演化可以产生Ia型超新星、X射线双星、伽玛暴、激变变星、软X射线源、中子星、黑洞等高能天体。通常双星演化的过程是很复杂的,现在我们先看看一些最基本的过程:双星由两个主序星构成,随着恒星演化,质量较大的恒星充满洛希瓣,发生物质交流。物质交流有两种可能性,一种是稳定的洛希瓣物质交流,这时会产生一个长周期的白矮星—主序星双星系统;另一种是动力学非稳定的物质交流,这时会产生公共包层。公共包层和里面的双星系统的转动不是同步的,公共包层的演化有两种可能性,如果双星轨道能量足够的话,公共包层会被抛射,产生一个短周期的白矮星—主序星双星系统;如果公共包层没法抛射,就会并合产生一个快速自转的中子星。

现在我们来讲其中的两个问题,一个是物质交流是不是稳定,即物质交流的稳定性判据问题。物质交流是不是稳定决定了双星演化的最终结局,可能形成一个长周期的双星系统,也可能形成一个短周期的双星系统,甚至一个单星。另外一个问题是公共包层的演化,这是一个多少年来一直没有解决的问题。人们做了各种各样的处理,包括各种数值模拟,过去几十年一直在做这方面的工

作,但是一直没有解决。公共包层的演化会决定是产生一个短周期的双星系统,还是并合产生一颗单星。我们现在的研究工作试图对这两个问题的解决作一些贡献。关于物质交流是不是稳定,以前采用的是多方模型,现在我们采用的是“真实的”恒星模型。但是,以前正常恒星结构演化模型没法计算恒星的物质交流是不是稳定的,我们想重新做一个“非正常”的快速物质转移的模型。以前在研究公共包层的演化时,不管用什么方法,包括数值模拟,其结果都不是很确定,这里面有两个问题,一个是核的定义,如果核的定义不同,关系到的能量相差很大,有时会差几个量级,这将引起很大的偏差。所以我们现在想把这个核的定义搞清楚。另一个问题是包层结构的计算。

我们现在正在做的模型是恒星物质快速损失模型。正常的恒星演化方程有四个,即质量守恒方程、流体静力学平衡方程、产能方程和能量传输方程。在恒星快速物质转移的时候,如果用这几个方程去求解,恒星演化模型是做不下去的。所以在发生物质快速转移的时候,我们假定恒星中热没有流动,即是一个绝热过程,在这种假设下产能方程和能量传输方程换成了熵方程和化学丰度方程,即假定在恒星发生物质交流的时候熵轮廓和化学丰度轮廓保持不变。

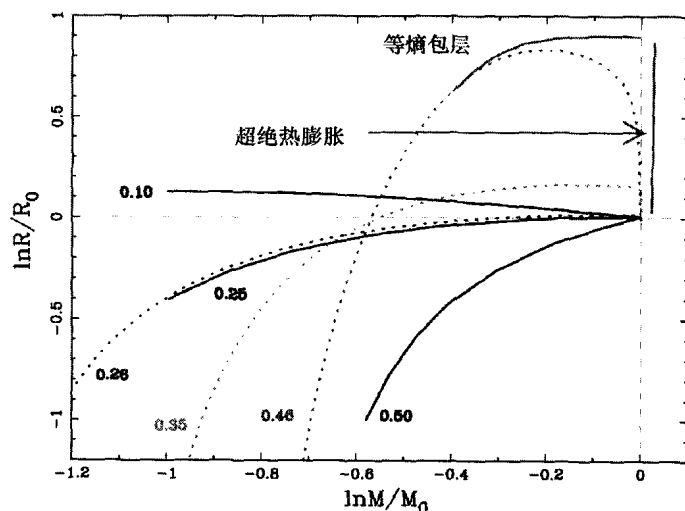


图1 一个太阳质量的恒星绝热损失物质时的半径响应

图1是我们最新的一个结果,这里面横坐标是质量的对数,从右到左质量

在损失, M_0 是恒星初始质量。纵坐标表示恒星的半径与初始半径的比值, 从上到下半径在下降。恒星随着质量的变化半径在变化, 这个图表示一个太阳质量的恒星的变化, 图上标 0.5 这条线表示核质量占整个质量的 50%, 0.25 表示核质量占的比例为 1/4。在图中同时也给出了以前利用多方模型给出的结果, 用黑实线给出。从这里面可以看出, 当一颗红巨星的核质量占恒星总质量的 0.1 时, 损失物质会使恒星半径变大, 随着恒星的演化, 当核质量占整个质量的 50% 时, 物质损失, 半径反而变小, 这是以前多方模型普遍采用的结果。但在我们“真实的”恒星演化模型, 结果却完全不同。在核占的比值比较小的时候结果和多方模型还比较接近。当核的质量比较大的时候, 在真实模型里面, 当物质开始损失的时候, 半径不是下降而是增加, 当有很大一部分质量损失以后, 半径才开始下降。

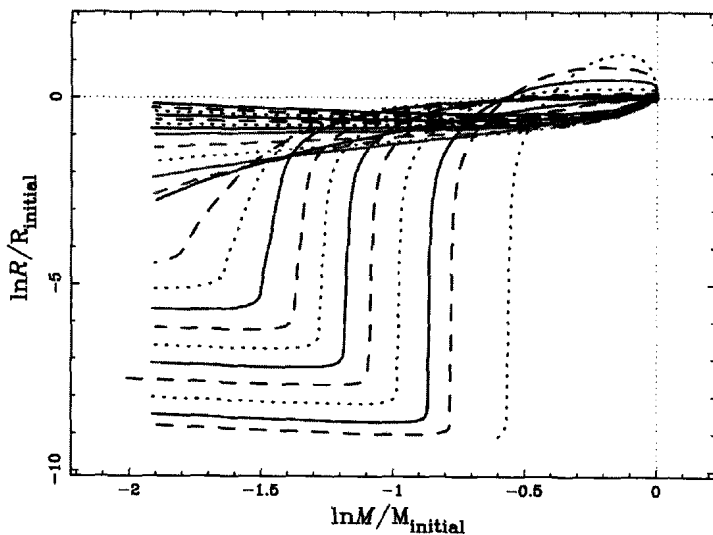


图2 恒星半径与质量损失关系

图2是一个太阳质量的恒星在不同演化阶段快速损失物质时, 恒星半径随着质量丢失而发生的变化。恒星分别处在主序阶段和红巨星阶段。该图显示的结果与多方模型完全不同。从这里我们可以看到, 对于一颗红巨星来讲, 物质交流刚开始的时候, 它的半径会变大。但是当一部分物质丢失以后, 物质损失反而使恒星的半径变小, 之后出现一个平台。所以, 我们可以得到恒星物质



损失和半径的变化关系,并和其洛希半径相比较,从而判断物质交流是否稳定。同时,我们还可以得到恒星的核的具体位置。

这样,我们可以解决天文上的很多问题。比如现在宇宙中发现有很多特殊恒星,用以前的模型都没有办法解释它们的形成,但是用我们这个模型很多问题都可以解决。又比如,如果知道某一类天体的轨道周期,通过该研究我们又可以比较精确的知道核的边界,就可以得到公共包层演化的结局。我这里给出的是一个太阳质量恒星演化的情况,相对比较简单。如果是大质量的恒星,演化情况要复杂得多。在以前的模型中通常是一个核加一个外壳,然后是公共包层的演化,这样会产生很多矛盾,比如说能量之间的比例等。我们的模型可解决以前的矛盾。通过我们的这些工作,还有助于解决天体工作中的许多其他问题。具体是哪些问题,现在还不清楚,要等模型完全做好以后,才会有一个比较清晰的概念。

黄润乾:

这个模型中心还是氢燃烧吗?

韩占文:

在演化的不同时期是不同的。可能是氢燃烧,也可能中心是简并的氦核,外边是氢的包层,氦还没有燃烧,也可能是中心氦燃烧。

彭秋和:

你刚才讲公共包层的演化,我想问一下,标准 Ia 型超新星,按照标准的模型就是白矮星吸积,而且过去没有考虑它的公共包层。但是公元 1006 年的超新星,古书中有记载,过了 10 年再现,1016 年又有记载。前几年有个观点,爆炸时候产生 X 射线、紫外线,爆一次后物质追上原来的星风物质,然后激发,让光学再现。这个观点发表了,当时我听了他的 2006 年的报告,我觉得虽然是 Ia 型超新星,没有公共包层,但是也可能也有。所以我想问一下,你这里有没有考虑这个演化。

韩占文:

Ia 型超新星要产生爆炸,白矮星要从伴星吸积物质,物质增加到钱德拉质量极限。但是在这个过程当中,吸积过程按照以前的模型物质吸积速率不能太高也不能太低,太低了以后,白矮星质量不但不增加反而会减少。只能按照一个临界吸积率来吸积,多余的被吹跑。所以你刚才说的,它外面是有一层很厚的星风,爆炸的时候,冲击波赶上前面抛出去的星风产生了一些物理过程。

黄润乾:

我还有一个问题,你讲的是双星,一颗星的物质大量流到另一颗星。这个模型是讲主星质量流出去的一个模型,你应该还要考虑另外一颗星接收大量物质的一个模型,这颗星会膨胀得非常快,瞬间充满了洛希瓣,变成了相接了,那就完全是另外一个系统。

韩占文:

这确实是 Ia 型超新星遇到的一个困难。如果物质转移速率刚好,可以产生 Ia 型超新星。实际很多情况往往不可能这样,往往是比较大,这个白矮星,因为不可能接纳那么多物质,膨胀变成一颗巨星,产生公共包层,可能 99% 的 Ia 型超新星都产生不了。日本的专家发明了一种光学厚的星风模型,按照恒星演化的新物质不透明度表,由于铁不透明度的峰值,会产生光学厚的星风,就是多余物质被星风吹跑,形不成公共包层。这是一个最基本的假设。现在所有的模型都依赖于这个假设给出来的,如果没有这个假设,就像黄润乾老师所说的,会产生公共包层,没有 Ia 型超新星。到现在为止,观测上还没有什么证据,所以一定要需要这个假设。

黄润乾:

我认为这个模型最有用的还是用在单星的 AGB 星,因为物质大量丢失,瞬间丢失了,瞬间从往白矮星走,外壳丢掉,因此这个模型就是用熵公式去掉其他的,可能适用于 AGB 的演化模型。它没有伴星,没有接受它的星,你的这个模型算出了什么?

韩占文:

与物质交流稳定性判据有关。因为物质交流是否稳定,要看洛希瓣半径的变化、恒星半径变化,看它们的相对变化。我们这个模型给出的就是恒星半径的变化,随着物质交流的一个变化,如果恒星半径增长速度比洛希瓣半径快,会产生非稳定的物质交流,这时会产生公共包层。按照我们的模型计算,刚开始物质交流是不稳定的,过一会儿又稳定了,这是以前从来没有人想过的,这样有可能解释一些特别的天体。以前的模型,物质交流要么是稳定产生长周期的双星,要么是不稳定产生短周期的双星,我们现在介于两者中间的状态,一开始不稳定,后来稳定了,产生中等周期的状态。

黄润乾:

不管怎么讲,想个什么办法形成星风,它把角动量带走了,大量角动量被带走了,两个星马上就要合并,就是一个公共包层。即使是另外一个星,不是膨胀,但是星风带走这个角动量,就要靠近,所以这个办法很难。

韩占文:

你讲的是 Ia 型超新星的情况。刚才说的是稳定的还是非稳定物质交流,有可能出现第三种情况,先非稳定,后稳定,利用这样的模型计算,有可能有助于解释一些特殊的现象。能不能计算一下,这个星风到底能不能产生。

王永久:

接着黄润乾老师的话题,你们讲的是一个太阳大小质量的恒星,如果这个恒星质量再大一下,要考虑广义相对论效应,质量在往下落的情况下就会带来广义相对论的质量亏损,这个质量亏损是广义相对论特有的效应。这样算起来,如果质量比太阳质量大一些,这个问题必须考虑。这是我想到的一个问题。另外一个问题,就是流体力学模型,因为它的引力场很强,在恒星物质过程当中,也要有广义相对论的流体力学那套公式,包括三个计算,可能会带来一些修正。

韩占文:

我觉得这是个很好的问题,在天体上很多问题都不清楚,比如说在恒星演化里面,做了很多简化的假设。

王永久:

因为广义相对论是非常准确的,包括你刚才质量的限制,广义相对论给出来是很严格的。

韩占文:

在恒星里面多东西是没法做的,实际上里面有一些参数,里面也有一个对流混合的参数。我们把模型计算结果和观测结果进行对比,对这些参数进行定标,但是定标以后,得到对流参数 $\alpha = 2$ 的模型,但是并不代表这个对流的参数真的就是 $\alpha = 2$ 。没有考虑的各种因素,像你说的广义相对论效应,可能实际上都在参数里面。

王永久:

你讲的都是太阳这种质量的,但是再大一点呢?

韩占文:

这个是天体物理一个特点,好多不确定因素,很多效应比这种不确定因素要小。不可能每个因素都考虑。

黄润乾:

给你提供一个建议,你这个模型非常有意义,将来应该是行星状星云形成的非常好的模型,而且是可以解释行星状星云的两个核。我认为,这个不论是单核还是双核都非常好。



恒星物理中值得研究的问题

◎ 黄润乾

我提出两个问题,跟大家讨论一下。第一个问题是恒星的磁场与转动。从天文观测可以知道,小质量恒星表面有很强的磁活动现象。例如,太阳表面的黑子和耀斑都是磁活动现象,还可以看到耀斑周围磁力线的存在。恒星的磁活动现象都有一定的周期性。太阳每 11 年有一个活动周期,而且周期会慢慢变化。大质量星转动比较快,而天文观测发现,大质量星在主序阶段表面的元素丰度会出现异常现象,比如 He、N、C、O 元素丰度出现异常。现在的解释是由于转动效应可以将内部核反应区域的元素带到表面上来。因此近年来,关于有磁场和有转动的恒星演化模型开始热起来,文章也比较多。

简单地介绍一下国外的研究进展。考虑了转动效应以后恒星的结构变成非球形结构,变成了一个椭球体。变成椭球体以后,内部结构就会发生变化,即内部的温度、压强、密度的分布会发生变化。另外恒星转动后,内部会出现较差自转,即一层一层之间的转动速度不一样。此外,恒星内部还出现一些新的物理过程,例如出现子午环流。什么是子午环流? 因为恒星转动以后,辐射流不是各向同性的,辐射对气体的加热也变成各向不同性,沿着转轴方向辐射对气体的加热比较大,而沿着赤道面方向辐射对气体的加热比较小,因此造成气体物质沿着转轴方向升起,然后沿着赤道面流入,我们把气体物质的这种运动叫做子午环流。由于较差自转和子午环流,就会导致恒星内部角动量转移和化学元素转移。子午环流就可以把内部核反应区的元素带往外部,造成在主序阶段就会看到大质量星表面丰度的异常。

国外在磁场方面做了许多工作,首先,他们研究了磁场是怎么产生的? 即产生机制是什么。研究的结果证明,恒星的磁场主要是较差自转产生的。其次,他们研究了磁场和转动效应的相互作用。简单地说,转动效应使恒星内部产生角动量转移,而磁场效应是抑制角动量转移。两个效应对角动量的转移起



相反的作用。可以想象,磁场可以使恒星由较差自转转化为刚性自转,而变为刚性自转后就没有较差转动,也就使磁场消失。磁场消失后,转动效应又产生较差自转和产生磁场。这样,恒星内部就会出现一段时间有磁场存在,然后磁场消失,然后又产生磁场,即磁场会周期性的存在和消失。除此以外,国外还研究了磁场和转动效应对于单星演化的影响。他们研究了有磁场没有转动、有转动但没有磁场,或既有转动也有磁场等三种不同情形下的质量单星的演化。证明在赫罗图中三种情况下的演化轨迹是不同的(他们只做了一个主序的演化)。以上是简单地介绍国外研究进展。

分析国外的研究进展,我个人有一些看法:首先,我认为他们忽略了磁场对物态方程的影响。为什么我认为磁场的存在会影响物态方程呢?为了推导恒星物质的物态方程需要先写出恒星物质系统的自由能,然后应用麦克斯韦方程进行偏微商就得到了物态方程。写自由能的时候,就要写出电子的自由能,而电子与磁场应该有相互作用,所以磁场的存在会影响物态方程。国外工作者到目前为止忽略了磁场对物态方程的影响。实际上物态方程对恒星结构演化非常重要。物态方程的变化会使所有热力学量变化,使得恒星内部整个热状态发生变化,即温度梯度变化。第二点就是他们忽略了磁压的作用。在恒星内部相对于气体压强来讲磁压比较小,于是他们在研究大质量的主序演化时忽略了磁场。但是如果研究恒星的晚期演化,比如研究到 AGB 星和红巨星的演化,特别是 AGB 星和红巨星的表面性质时,这时气体压强降低了好多个数量级,于是磁压就不能忽略。第三点,他们的研究发现了转动效应造成较差自转,和使角动量转移,而磁场又阻止角动量转移,阻止较差自转。其后果是,恒星内部的磁场会周期性变化,即一段时间有磁场存在,然后又消失,然后再产生磁场……联想到天文观测现象,天文观测发现恒星的振动都有长周期变化,比如太阳有 11 年的长周期变化,而恒星振动的长周期变化,包括太阳的 11 周年长周期变化到现在为止还没有理论上的解释。我大胆地设想,恒星振动的长周期变化可能与磁场的周期性变化有关。如果是这样,将使我们找到一个很好的研究课题。

再者,在国外的研究进展中,他们仅研究了有磁场和转动的大质量单星的演化,没有研究有磁场和转动的双星演化。是不是双星就没有磁场?双星中有



潮汐作用,潮汐作用使得子星的自转和公转同步,而且子星内部也应该是刚性同步转动的,因为内部的每一层都要受潮汐的作用。既然内部是刚性转动就不应该有磁场。但是,双星在演化过程中有特殊情况发生,比如说两颗子星之间发生物质交换。当一颗子星的物质流到另一颗子星,并且携带着角动量流过去,这个时候无论丢失物质的子星,或是接受物质的子星,其内部各层的密度、物质和角动量都要重新分布,使各层的转动速度发生变化,因而可以产生较差自转和产生磁场。因此,当两颗子星发生物质交换过程时,子星内部可以存在较差自转,也可以存在磁场。因此,我们可以研究有磁场转动的双星演化,这是国外还没有研究的问题。

还有一个问题,天文观测到的食双星的光变曲线中往往出现畸变现象,畸变现象过去一直用黑子来解释,黑子面积甚至可以很大。我们也想到是否双星中的其他物理过程也会造成光变曲线中的畸变现象?例如转动效应、磁场效应、外拉格朗日点物质和角动量损失效应等可能会造成光变曲线的特殊变化。

总结上述分析,我们可以研究磁场对物态方程的影响;在结构方程中考虑磁压;由于磁场与转动相互作用,使磁活动现象存在长周期性变化,以及使恒星振动有长周期变化;双星发生物质交换时,在子星内部可以产生磁场;研究各种物理过程对光变曲线中的影响等。所以说,磁场和转动问题虽然国外已经开始做了很多工作,但是我们现在赶紧做,很有前途,因为我们有自己的想法,有我们自己的特色。

现在我讲第二个问题,就是引力势问题。20世纪70、80年代,人们已经知道恒星的能量是内部的热核反应产生的。但是,观测到星系的能量远比恒星的能量大很多个量级。星系的能源是什么?是不是什么高能物理过程产生的?在一段时期这个问题曾经很热门。过了一些年,发现了吸积盘的存在,才明白原来星系的高能辐射不是来自于什么特殊的高能物理过程,而是来自于引力势能的释放。物质被黑洞吸积后,其势能释放并辐射出来,这个能量很高,远比恒星内部核聚变产生的能量高很多个量级。当时我就想到在恒星里面会不会也有引力能的释放问题。我第一个就想到了双星。双星分为好几类,如分离型双星、半相接双星和相接双星,当一颗子星充满洛希瓣,物质就会流向另一颗子星。伴随物质的转移,会有引力势能、动能和热能的释放和转移。因此,在双星

模型里我第一个就想到在物质交换的时候,应该考虑到能量的转移。而当时的双星理论只考虑物质的转移不考虑能量的转移。我们用考虑能量转移模型,得到的双星演化结果不一样。图 1 是被接受星的半径随接受质量的变化。黑线是考虑了能量转移,虚线是不考虑能量转移。可见接受物质的星如果同时接受到能量,它的半径增大非常快。这是我们做的结果之一。

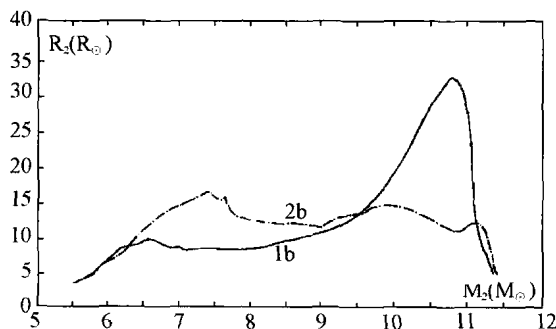


图 1 接受质量的恒星半径随质量的变化关系。

图中 1b 和 2b 分别表示考虑和没考虑能量转移时的情形

考虑能量转移和不考虑能量转移的演化结果不同,这是我在 90 年代发表在 A&A 上的一篇文章。当时记得投稿后,第一审稿人不同意,因为我用的名词叫做能量交换,他觉得不妥。我申辩以后寄到第二个审稿人,他说他们也发现了这个现象,为了调和矛盾,他给论文起了另外一个名字,叫 heating,就是加热。就是物质转移的同时又加热了另外一颗星。其实意思是一样的,只是取名不同。后来我在研究相接双星的演化时也考虑这个思路,即考虑物质转移的同时,也考虑能量的转移。

先介绍国外的情况,国外从 20 世纪 70 年代到现在,在研究相接双星演化时,采用的比较热门的模型叫做热弛豫振荡理论(TRO 理论),简单说这个理论的特点是:相接双星中首先是能量从主星转移到次星,次星得到能量以后将膨胀。次星膨胀后又将物质返回转移到主星。那么,为什么叫热弛豫模型呢?在双星理论中可以证明,如果物质从小质量次星转移到大质量主星时,两颗星的距离会拉开。因此,在相接双星中,如果物质从次星流向主星,就会使两子星的距离拉开,双星可能会由相接双星变成半相接双星。一旦成了半相接双星,物



质就又会从主星流向次星,然后两颗星的距离变小,双星系统又变成相接双星,然后又变成半相接……因此,双星系统就在相接和半相接之间来回的振荡,所以叫做热弛豫振荡理论。这个模型的结果与很多观测现象相矛盾。我认为国外的理论有不自洽的现象。首先能量由主星流到次星,但没有物质流向次星,这只有一种情况才能发生,即公共包层内存在环流。环流使物质流过去又流回来了,因此物质没有流动而能量流动了(当两颗星的温度不一样时)。但是在另外一个物理过程中,即物质由次星流向主星的时候,为什么就不存在环流呢?从理论上说是不自洽的。还有一条,它的能量流又是什么机理产生的?他们回答不了这个问题,不知道能量转移的机理是什么,因此计算能量的转移时,只好用一些经验公式计算。这是国外从 70 年代到现在热弛豫理论存在的矛盾。

现在我们的相接双星模型是:当物质从一颗星流到另外一颗星的同时,会导致引力能、动能和热能的转移。我们也取得了很好的结果。遗憾的是,审稿人就是热弛豫理论创始人,他希望我修改,修改成热弛豫理论,我不同意。现在我们只有一条路,把天文观测事实摆出来,看是否可以解释天文观测事实,现在我们正在做这个工作。我就介绍到这里,两个问题,一个磁场和转动,第二个就是引力势问题,引力势在双星模型里应该考虑。

王永久:

我的第一个问题是针对国外的情况提出,就是磁场和转动,这两个效应按照爱因斯坦的引力场方程严格的解,有一个定理,给出来就是转动矩激发外部的稳态引力场属于纯磁场,与外面的引力场是相同的。这里面解释了天体场源磁场的性质,和它的转动性质是有内在联系的,因为它们都是等效的。如果同时有,则有转动和磁场,它的效应应该正向叠加。

黄润乾:

在恒星情况下,物理过程的传播远远达不到光速,不需要相对论。恒星磁场是由于非稳定性产生的,磁场的传播可以看成等离子波的向外传播。



王永久:

从物理机制来看,有广义相对论和非广义相对论的,处理的形式也不一样。我说的这个定理是从物质微观的性质来推断,就是物质的中心质量的恒定磁场产生的引力效应和纯转动产生的引力效应是可以等效的,也就是有内部联系的。

黄润乾:

我们说的磁场是恒星内宏观的磁场,不是微观粒子的磁场。我们知道恒星从星际介质塌缩到恒星的时候有一个原始磁场,因为星际介质本身有磁场,星际介质塌缩成恒星时使得恒星内部就有一个原始磁场。但是事实证明,较差自转产生的磁场比原始磁场要大几个数量级,所以原始磁场被忽略掉了。

林 隽:

我来补充一下黄润乾老师讲的,在太阳内部的磁场,实际上就是发电机理论。你说的在太阳内部,至少磁场不是稳态的,由于恒星内部等离子体电离度比较高,磁场和等离子体冻结在一起。等离子运动带动磁场一启动,等离子运动其实吹出磁场来,在垂直磁场方向上相当于新的磁场,即放大磁场。这个是发电机基本的原理。多出去的磁场哪里来?能量哪里来?就只能是等离子动能的,所以能量平衡值是这样来的,不会说磁场放大等离子体能也增加。等离子能增加了磁场能减少或磁场能增加了等离子体能减少。所以就是这么一个过程,相对论效应还考虑不到,特别小。

彭秋和:

你刚才讲的物质的状态方程,我觉得这很重要,当然取决于磁场的大小,如果有磁场,它的状态方程一定会是各向异性的。我过去讲,怎么推恒星里面的气体压强的时候,推的公式就是这样,如果有磁场,电子在朝着垂直磁场方向运动的时候,那么拉莫进动也要有影响,沿着磁场方向跟原来一样。虽然不是很强,不考虑量子力学,即使经典力学的但是也受到影响,所以碰撞的时候,动量传递的方向不一样,可以去推导估计一下。



林 隽:

不一样的。彭秋和老师,恒星内部考虑的是等离子体整体。

彭秋和:

整体做过统计平均吗?

黄润乾:

我正想请教,电子和磁场相互作用的物理过程不是很清楚,电子怎样和磁场相互作用?

彭秋和:

我想还是经典宏观的拉莫尔进动。

林 隽:

这个只在等离子稀薄的时候,气体压远远小于磁场压的时候才可以。但是在恒星内部,情况正好相反。刚才黄老师讲了,恒星有周期性的现象,到一定时候,磁场放大到一定程度,不能再放大,就以爆发形式把磁场抛出来。



致密天体研究的几个问题

◎ 韩金林

我今天主要汇报几点:①脉冲探测银河系磁场的最新进展;②我组的王伟副研究员发现一颗新的 X 射线中子星;③亚毫脉冲星形成的可能途径;④利用 FAST 研究脉冲星要解决的问题。

磁场在天体物理研究中非常重要。银河系的磁场尤其重要,比太阳磁场还重要,为什么呢?第一,因为银河系的磁场不仅仅是银河系本身的事情,最近还变成宇宙学研究的一部分。银河系磁场引起的射电辐射严重影响宇宙微波背景测量,测量值的 95% 是银河系来的,不扣除是不行的。

第二,宇宙线的研究依赖于银河系磁场,否则研究不了。因此,银河系磁场的研究是天体物理和粒子物理的根本的问题之一。银河磁场测量非常麻烦,目前用脉冲星作为探针测银河系磁场是比较好的。目前,世界上能用来作为探针的脉冲星有 1024 颗。我们测了多少呢?我们 1999 年的时候测了几十个,别人大概测了两三百个,2006 年时候我们发表了 203 颗,现在又有 477 颗,所以,2/3 以上是我们测的。我们的数据多,且权重很大。国际上一些同仁也用河外的源探测磁场,效果差多了,因为磁场在银河系里面拐来拐去,用路径积分测量当然结果不好。也有些人在搞模型,模型是搞不清楚整体结构时用测量的一点点数据去拟合。现在有这么多数据,我们直接去测量磁场,结果就显得比别人好得多。

第二点就是我组的王伟发现了新中子星。他原来是南大天文系毕业的,在德国马普地外所 INTEGRAL 课题组工作了几年,博士毕业回来,现在在我们课题组。我们承担了基金委的重点项目,关于脉冲星的高能辐射的研究由他来负责。从 INTEGRAL 卫星数据中找出了个区域,尽管很多强源被人研究过了,他找到别人没有研究过的两颗不是很强的源仔细研究,发现 4U 2206 + 54 是位于大质量 X 射线双星系统中的强磁场中子星。另外一个源,IGR J0158-67,他发



现这个源在变,得到了周期,发现是 X 射线脉冲星。

第三点关于亚毫秒脉冲星的形成,这是我组博士生杜源杰在徐仁新老师指导下做的,有点“非主流”。一般认为,一个白矮星吸积很多物质,到了钱德拉塞克质量之后就要塌缩,一般塌缩成为中子星。可是,我们考虑塌缩成奇异星的情形。计算发现,塌缩爆炸后的核如果是 0.001 个太阳质量,有 1 千米的半径,自转周期可以到 0.06 毫秒。如果有 0.01 个太阳质量,半径有 4 千米,自转周期可以是 0.07 毫秒,比已经发现的毫秒脉冲星周期要短一个量级。这是个新观点,详细的由徐仁新老师可以再讲。

第四点也是比较重要的问题,中国正在建设一个大的射电望远镜——FAST,天文界都很兴奋。脉冲星是该望远镜最主要的观测目标。涉及如下科学目标:①极端脉冲星的研究,如探测亚毫秒脉冲星,这在物理上非常重要,我们当然要看刚刚提到的第三点,这样的天体有没有可能形成,如果物理上有可能形成的话,我们再去找。另外,利用 FAST 还可研究磁星、高速度中子星、长轨道周期脉冲星等天体的性质。②利用中子星—中子星系统和 中子星—黑洞系统(NS-BH)验证引力理论。刚才韩占文老师介绍了双星的演化,两个大质量的星可以演化成双中子星系统或者中子星+黑洞系统。那么究竟有多少 NS-BH 系统呢?物理上找这样的系统非常重要。因为中子星和黑洞构成双星系统,引力效应最强。双中子星系统已经把广义相对论检验得非常精确。要进一步检验引力理论,特别是爱因斯坦的广义相对论对不对,需要到 BH-NS 这种强引力系统。寻找这样的系统是国际上天体物理界的热点前沿问题,也是个难题。③引力波的探测。这需要对很多毫秒脉冲星(MSP)长期测时。引力波探测是国际上天体物理界的热点问题,我们还可以用 FAST 探测脉冲星辐射物理、探测星际介质等。有些探测还处于初步的阶段。银河系靠近太阳这半边我们已经探测了磁场,另外半边天区等着将来的 SKA、FAST 等仪器来做。问题实际也不是想象的那么简单,因为①银河系有背景辐射;②银河系有很多电子。所以探测的灵敏度不仅仅跟望远镜有关,而且跟背景辐射有关,还有跟电子的散射有关系,因为电子会把脉冲信号散射没了。在低频的时候,脉冲轮廓因为传播效应变宽就探测不出了。所以,探测银河系另外半边天区的脉冲星不能选择在低频。我担心现在的大望远镜涉及的观测频率选得不好,可能要到更高频

才好。举个例子说明一下。脉冲星的探测灵敏度与这些参量有关:①系统温度。这个系统温度不仅是天文望远镜甚至还包括天空背景,要探测银河系另外半边,银道面在低频的天空背景特别的亮;②脉冲周期;③脉冲宽度。刚才讲了,脉冲宽度会因为星际介质散射被拉宽以至看不到脉冲了。另外还有一个限制,因为是黑洞与中子星绕转的双星系统,广义相对论效应特别强,双星轨道周期就特别短,如果要积分探测半小时,有可能轨道周期调制使脉冲自转周期被模糊掉。本来,脉冲星自转周期非常准,但一个轨道周期下来,数据中的多普勒效应使周期完全模糊了。这个是一个探测技术的问题。脉冲星 PSR J1906 + 0746,最近 Arecibo 发现的,大概是 2 个小时的轨道周期。

尽管银河系中心有很多脉冲星,目前为止很多搜寻的工作都失败了,主要原因是由于散射太强了。在银河系中心旁边有一个超新星遗迹 SNR G0.9 + 0.1,刚刚发现的脉冲星 PSR J1747-2809 周期是 52ms。这颗脉冲星是最年轻的脉冲星之一,在遗迹的中间。然而 Parkes 64m 望远镜花了 9 个小时在 1.4GHz 没有测到。用 GBT 的 1.9GHz 去测,花五六个小时才测出来。再用 Parkes,在 2.0GHz 观测,9 个小时也能测到了。所以搜寻远距离的脉冲星,观测频率是个问题。FAST 望远镜要做脉冲星搜寻是否要频率高一些。另外,南天有很多脉冲星,FAST 到底能看到多少个? 应该做一个模拟去研究。我们研究脉冲星的同行要多培养人才,在 FAST 建成后要有队伍跟上才行。

张 力:

你认为,FAST 在多大的频率上做观测比较好?

韩金林:

我刚才强调了,低频散射对低银纬远距离脉冲星搜寻影响非常大,高银纬好一些。另外,要考虑脉冲星频谱比较陡,高频的时候脉冲星比较暗弱,因此不能到 5GHz,低频不能到 1GHz;2GHz 左右是最佳选择。当然带宽要尽量宽。

彭秋和:

我们国家技术能力行不行?



韩金林:

不行就引进和合作。但是我们首先要想清楚科学在那些地方有突破点,然后去解决问题。现在的问题是没有人好好思考科学问题。

林 隼:

培养人才的问题,你们怎么解决?

韩金林:

首先我们这些研究脉冲星的人很不够。2009 年我办了一个脉冲星 summer school,把国内所有的脉冲星前沿工作者请过来给有兴趣的人员普及和引导做脉冲星研究。原来预计 50 人,报名的学员有 150 个人。通过学习,尽量要求学员做一个相关的课题,可以与专家交流。有兴趣就会去做。脉冲星要研究的问题很多,真正好的学生会感兴趣留下来。如果有 10% 的学员将来真正研究脉冲星就很好了。我们希望通过举办讲习班,培养更多的人才。



关于活动星系核中心黑洞质量估计的系统偏差及其修正

◎袁为民

刚才几位专家讲了很宏大的问题,我在这里讲一个小问题,就是关于活动星系核中心黑洞质量估计及存在的偏差,以及我们怎么去修改这个偏差,这是我与博士生以及中国科学技术大学天体物理中心的几位老师及国外合作者合作的工作。

我们知道,活动星系核中心黑洞质量是一个非常基本的参数。我们研究活动星系核中心黑洞系统时,所关心的基本参数有三个:一个是它的质量,一个是它的自旋,另外一个黑洞的吸积率,其中质量是最重要的。除此之外,黑洞质量这个参数对研究活动星系核物理是非常重要的,实际上对黑洞的形成、演化也是非常重要的,黑洞在整个宇宙演化过程中质量不是不变化的,当然还有黑洞的合并。黑洞质量的测定对星系的演化也是非常重要的,最近的研究发现星系的演化和中心黑洞存在很强的物理联系,通过黑洞的辐射和物质的外流对星系的演化发生作用。很明显,星系的演化和黑洞的演化现在认为是同时的,至少在很长一段时间。所以活动星系核中心黑洞质量的测量是非常重要的。

我先简单回顾一下活动星系核中心黑洞质量的估计。对于邻近星系中心黑洞质量的测量,我们可以通过高分辨率的观测,通过测量星系中心靠近黑洞附近的气体和恒星的动力学来估计。这也是哈勃空间望远镜最近几十年做的最大的成就之一,但是这个方法对活动星系核并不适用。原因很简单,因为目前的望远镜的分辨率是达不到的,还有就是活动星系核的辐射非常强,要测量中心黑洞附近的气体和恒星的动力学很难。有幸的是,人们发现有一种很好的办法来测量活动星系核中心黑洞的质量,就是 reverberation mapping (RM) 方法。如果翻译成中文应该是“响应”或者“反响”方法。在介绍这个方法之前,



我们先来了解一下活动星系核的结构。

图 1 是活动星系核中心的结构图,中心是大质量黑洞,黑洞周围是吸积气体形成的吸积盘,从吸积盘发出的辐射(连续谱)会将黑洞周围一定尺度的气体(例如宽线区)电离,从而这些气体会产生发射线。当连续谱发生变化时发射线也发生变化。这个变化不是马上发生,它有一个时间延迟,光从黑洞中心的吸积盘传播到宽线区需要一段时间。这个时间就是距离除以光速,我们通过观测可以把时间延迟找出来,从而知道宽线区的大小。知道大小以后,利用维里定理,在一定假设的基础上,就可以

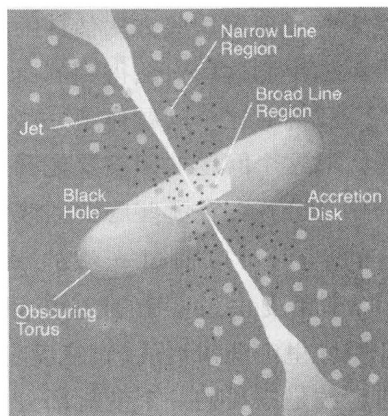


图 1 活动星系核中心结构

以得到黑洞质量。这个方法之所以成功,是因为最近 10 年,黑洞或者活动星系核物理取得了如下的主要进展:第一个是通过观测我们发现活动星系核宽线区的气体的运动是维里化的,其动力学是由中心黑洞的引力来支配的。第二个非常重要的就是发现了宽线区的尺度或者半径(R_{BLR})和活动星系核的光学(如 5100\AA 处)连续谱的强度或光度有非常好的关系: $R_{\text{BLR}} \propto L(5100\text{\AA})^\beta$, 这里 $\beta \sim 0.5$, $L(5100\text{\AA})$ 是在 5100\AA 处活动星系核的光度。根据这个关系我们可以通过观测活动星系核的光学光度来推测宽线区的大小。另外很重要的是,通过这个方法得到的活动星系核的黑洞质量估计和通过 $M-\sigma$ 关系(就是星系中心的黑洞的质量和星系的核球的质量之间一个非常奇妙的关系)得到的黑洞质量也是非常符合的。这样通过维里定理可以得到非常简单的活动星系核中心黑洞质量的估计公式: $M = fR_{\text{BLR}}\Delta V^2/G$, 其中 R_{BLR} 为宽线区半径, ΔV^2 为宽线区的速度弥散(一般用发射线的线宽 full width at half maximum (FWHM) 或线速度弥散 σ_{line} 来表示), f 为待定的比例因子。宽线区的半径可以通过光学光度的观测得到。这是现在我们通常用的活动星系核中心黑洞质量的估计办法。这个估计非常有用,因为只要做一个简单的观测,比如活动星系核的光谱观测就可以得到宽线区的速度弥散及其半径,然后估计出黑洞质量。

近些年已经发表了很多估计活动星系核中心黑洞质量的文章,如基于 $H\alpha$ 、

H β 谱线的观测,还有基于 Mg II 2800 谱线和紫外的 C IV 1549 谱线的观测。但是人们发现用这些方法估计的黑洞质量都存在系统的偏差,当然对同一个活动星系核黑洞这些方法得到的质量的误差主要并不是测量误差,而是系统误差。

我们对这个问题作了一些研究,想知道这些黑洞质量估计公式存在多少偏差。对这个问题的回答要先看一下,我们刚才所讲的活动星系核中心黑洞质量的估计公式存在哪些隐含的假设。我们先看一下公式构成的成分: R_{BLR} 是宽线区的半径,可以通过光学的观测定出来;速度平方 ΔV^2 是用发射线的线宽 (FWHM 或 σ_{line}),用的是单次测量谱,一次测量给出的。问题在于,实际上严格按照维里定理来说的话,速度应该是维里速度,而有研究发现最好的表征维里速度的是谱线的一个变化部分,也是所谓的 root mean square (rms) 谱,通过对一条谱线的多次观测可以把变化部分得出来。所以以前的这些黑洞质量的估计中隐含两个基本假设,第一个假设就是对于所有的发射线估计的都是单次测量光谱的谱线的宽度,即单次测量得到的谱线的 FWHM (或 σ_{line}) \propto rms 谱的谱线的 FWHM (或 σ_{line});第二个假设是针对 Mg II 2800 谱线的。Mg II 线是在近紫外,对于高红移的活动星系核很适用。对于 Mg II 线来说,刚才的公式有一个强的假设,就是 Mg II 谱线的宽度和 H β 谱线的宽度是一样的,此外还有一个假设就是 Mg II 线的宽发射区和 H β 的宽发射区大小是一样的。这些假设到底对不对? Mg II 线和 H β 线的宽发射线区的位置是否一样? 我们的工作就是检验这些假设是否正确。如果这些假设没有问题,那么相应的公式是可以用的,如果有问题的话,这些公式会存在系统性的偏差。我们的检验所使用的数据是 Peterson et al. (2004) 给出的 35 个活动星系核的 RM 数据,和哈勃空间望远镜以及 International Ultraviolet Explorer (IUE) 给出的这 35 个活动星系核的紫外数据。同时我们也分析了 Sloan Digital Sky Survey Data Release 5 (SDSS DR5) 星表里面红移在 0.45 ~ 0.75,同时具有 H β 线和 Mg II 线的 495 个活动星系核的数据。

我们作了哈勃空间望远镜、IUE 和 SDSS 数据的紫外和光学光谱分析,如 Mrk 335 和红移比较高的 SDSS J131459.75 + 505932.9,具体的 Mg II 线的分析还是非常复杂的,因为 Mg II 线附近有非常强的 Fe II 线。现在来检验刚才所提到的两个假设,第一个是单次测量得到的谱线的 FWHM 是否与这个 rms 谱的是一致的。我们给出了单次测量的 Mg II 线的 FWHM 和 rms 谱的 H β 线 σ_{line} 两

者之间的关系图,如果相等,把两者分别以横坐标和纵坐标画出图,则是一比一的直线,但是发现这个不是一比一的,如果做一个线性回归的话,可给出两者之间的关系式。所以,第一个假设是不对的。 Mg II 线的线宽和 $\text{H}\beta$ 线的线宽是否是一样的,我们也做了检验,在线宽比较大的时候,发现 Mg II 线的线宽要小于 $\text{H}\beta$ 线的线宽,两者之间偏离一比一的直线,系数是 0.8。所以,第二个假设也是不成立的。

现在看看检验结果。刚才讲了,第一个假设是不成立的,就是单次测量谱的线宽不等于最好表征维里速度的 rms 谱的线宽。维里定理中黑洞的质量公式为 $M = fR_{\text{BLR}} \Delta V^2 / G$, 公式中的 ΔV^2 代表的是维里速度,如果上面的关系不成立,则使用单次测量谱的线宽的公式则其指数不能等于 2,即应该为 $M = fR_{\text{BLR}} \text{FWHM}^\beta / G$, 参数 β 应该从数据中定出,而不是假设为 2。第二个假设,对 Mg II 线,其单次测量谱的线宽不等于 $\text{H}\beta$ 线的单次测量谱线宽,尤其在线宽比较大的时候。因此对于上面所给出的黑洞质量估计公式,参数 β 应该是不相等的。还有一个假设是 Mg II 线的宽线区半径和 $\text{H}\beta$ 线的宽线区半径一致,这是没办法确立的,现在没有数据来检验,理论上不成立,因为 Mg II 线只发生于部分电离的区域,而 $\text{H}\beta$ 线还可产生于完全电离区。也就是说 Mg II 线黑洞质量公式不能简单从 $\text{H}\beta$ 线黑洞质量公式中导出来,应该从数据中定出。而这恰恰是以往的做法。

知道了这些潜在的跟观测不一样的假设之后,我们就重新对黑洞质量估计公式做了定标,公式为

$$\log \left[\frac{M_{\text{BH}}(\text{RM})}{10^6 M_{\text{Sun}}} \right] = \alpha + \beta \log \left(\frac{L_{3000}}{10^{44} \text{ erg s}^{-1}} \right) + \gamma \log \left(\frac{\text{FWHM}(\text{Mg II})}{1000 \text{ km s}^{-1}} \right)$$

其中 L_{3000} 表示 3000Å 的光度, $\text{FWHM}(\text{Mg II})$ 表示单次测量的 Mg II 线宽度。对参数的估计我们也有不同的处理方法,如令 α 和 β 为自由参数,分别取 $\gamma = 2$, $\gamma = 1.7$, 或者令 α 和 γ 为自由参数, $\beta = 0.5$ 。我们发现不同的组合,得到的结果基本上一致。比如说 β 基本上等于 0.5, 而 γ 完全偏离 2。对线宽依赖的因子 γ 对 Mg II 线和 $\text{H}\beta$ 线分别为 1.51 和 1.09, 偏离了传统的 2。

利用我们的质量估计公式给出了活动星系核的黑洞质量,和文献中主要的几个黑洞质量估计公式给出的结果进行了比较,这些质量估计是目前比较主流

的定标较好的估计。比较结果说明:①以往的活动星系核黑洞质量估计公式存在系统偏差,使用时要非常小心,尤其是在高质量和低质量端,其中我们的结果与 Collin et al. (2006) 的是最符合的,因为他们的公式中做了相应修正,与我们的处理有异曲同工之处,但没有我们做的直截了当。②我们黑洞质量公式是系统偏差最小的,为什么? 首先我们摒弃了以前公式中暗含的、与观测数据不符的假设,参数完全由 reverberation mapping 观测数据决定。同时我们也应用了最新的 RM 参数的黑洞质量结果来定标,我们的公式给出的黑洞质量和 RM 得到的质量偏差最小, $Mg II$ 和 $H\beta$ 公式给出完全一致的黑洞质量的估计。所以,我认为我们的黑洞质量估计公式应该是正确的,这个是有观测证据的。

白金明:

你认为 reverberation mapping 这个方法本身是否有问题?

袁为民:

我认为没有问题,它给出的时延表征宽线区的大小没什么问题,本身也非常简单。只不过把这个得到的结果用于估计黑洞质量的时候,可能会有些小问题,这个就是我才刚才说到的问题,比如说线宽到底是不是维里速度的表征。仔细考虑会有一些小问题,但是对于由 reverberation mapping 得到宽线区大小是没有问题的。

白金明:

宽线区大小是没有问题的,我觉得把 reverberation mapping 相应的结果用到维里定理上是有问题的,可能光压也应该考虑进去,应该做修正。

袁为民:

你是说宽线区的距离、动力学并不完全是由活动星系核中心黑洞的引力所决定的。

王建民:

光压的作用马可尼已经有文章做过讨论,他们认为很严重,其实也有不同



的观点。

袁为民：

当然光压肯定是有影响的,问题是影响的程度究竟有多大。现在的 reverberation mapping 这种公式估计出来的黑洞质量误差都是很大的,比如说 100% ~ 200%,甚至 300% 的误差。在这个精度范围之内,我不认为光压的影响会有多大,以致产生重大的偏差。

王建民：

马可尼的基本结论是光压对窄线塞弗特 I 型星系的影响是比较明显的,吸积率小的话,光压小相应的效应也小。在你们的工作中,修正完了之后发现黑洞的质量与速度半宽严重偏离平方的关系,我觉得担心的是如果不是平方的关系,会严重偏离这样一个完全无规的维里化。这就意味着速度场可能应该有一个径向的运动,如果有径向的运动,我们应会看到至少第一是不对称,第二是蓝移或者红移。但是 $H\beta$ 的观测,之所以用 $H\beta$ 来做观测,是因为 $H\beta$ 是非常好的高斯轮廓,我觉得这点假设和结论有不大对的地方。

袁为民：

首先能够从观测数据上看,单次测量的 σ_{line} , FWHM 和 rms 的 σ_{line} , FWHM, 不管是 $MgII$ 还是 $H\beta$ 都不是一比一的关系,我说的指数不是 2 并不意味着说维里定理不对或不能用,我仅仅是说,单次测量的宽度并不代表维里速度,最好的维里速度应该用 rms 谱来得到,而这个用单次测量谱来估计的黑洞质量都是有偏差的。

王建民：

现在 SDSS 很多都是单次测量。

袁为民：

这个问题可以这样看, $H\beta$ 来自于不同的区域, RM 观测产生的变化的部分



只是总的 $H\beta$ 线宽贡献的一个成分,而那个成分恰恰是估计黑洞质量所要用的成分,对这个成分来说是指数是 2,但问题是 $H\beta$ 有不同的成分,一些成分根本就不是维里运动,但它也会对观测到的谱线宽有贡献,要用一次性测量的宽度来计算,会产生偏差。

吴学兵:

有个技术性的问题,现在的 $H\beta$ 和 $MgII$ 线的线宽的拟合是一个高斯还是两个高斯?

袁为民:

对于宽线成分是一个高斯。 $MgII$ 是双线,宽线部分用两个高斯来拟合,除此之外还有两个高斯是它的窄成分。

吴学兵:

速度线宽轮廓的拟合非常依赖于选择多少个高斯成分。增加一个高斯成分,选哪个高斯的半峰全宽非常重要。现在做 SDSS 的数据的都知道,用 $MgII$ 线,一个高斯,但 $H\beta$ 线都用两个高斯,因为 $H\beta$ 线旁边有 $O III$ 线,需要扣除 $O III$ 线的成分。

袁为民:

半峰全宽跟用几个高斯去拟合是没有太大关系的,不是特别敏感。我们加窄成分的拟合是为了去掉它,而不是利用它,用的是宽线的宽度。 $MgII$ 是两条线,以前有人做 $MgII$ 没有考虑是双线,高估了线宽。用两条线分辨不开,但用一条线就会高估。



脉冲星：基础研究与战略应用

◎ 徐仁新

今天我来谈谈脉冲星。脉冲星看似是一类非常简单的天体：它们不停地在旋转；因其辐射的各向异性，故随着星体的旋转我们就观测到周期性的脉冲信号（这有点类似于航海“灯塔”）。然而，就是这么简单一种天体，其实非常重要。我今天想强调的两点是：脉冲星不但在基础科学研究领域具有极其重要的学术意义，而且拥有珍贵的战略应用价值。在基础研究方面，脉冲星是集自然界四种基本相互作用于一身的一种“极端天体实验室”，像它这样的天体是罕见的，对于人们认识自然的本质意义非浅；在应用研究方面，脉冲星因其自转周期的稳定性而被认为是一种非常重要的“国家战略资源”，这主要体现在时间标准和航天器导航上。

我先简要介绍一下自然界四种基本相互作用是如何在脉冲星身上极端地表现出来的。

因较大质量和较小半径，脉冲星的表面引力场非常强。在这么强的引力场中，广义相对论效应是不能忽略的。我们知道，在牛顿力学中两体问题是简单的并可以严格求解，但若考虑到广义相对论效应，两体问题并非简单，至今也还没有严格解。1974年赫尔斯和泰勒发现了一对互相绕转的中子星（其中一颗中子星表现为射电脉冲星）。他们进而利用此双星系统后续的演化行为来检验各类引力理论，发现广义相对论的理论预言与观测一致。1993年，赫尔斯和泰勒因检验了强引力场中的广义相对论效应并间接证明引力波的存在而获得诺贝尔物理学奖。当然，不光在双中子星系统中强引力场效应不能忽略，其实在脉冲星表面及附近发生的很多物理过程中广义相对论效应都是比较重要；后者的相关研究包括脉冲星自身的引力波辐射，表面连续谱和线谱的电磁辐射，以及磁层粒子加速机制；等等。由此可见，脉冲星是强引力场研究的重要实验室。

同时，脉冲星也是弱相互作用和强相互作用都极端表现的天体实验室。脉



脉冲星的诞生于超新星爆发,但其具体爆发过程是怎样的呢?目前的主流观点认为是中微子驱动的,而中微子的产生、传输过程跟弱相互作用过程紧密相关。再说,脉冲星的内部结构到底是怎样的?这是一个跟基本强相互作用行为分不开的问题。根据20世纪60、70年代以来建立的粒子物理标准模型,我们知道自然界以轻子和夸克(称为基本费米子)为基本组成单元构成,而基本费米子之间通过交换规范玻色子产生相互作用。我们熟悉的质子和中子并非基本粒子,它们实际上是由夸克组成的。基本费米子之间一般都存在电磁、弱、引力等三种基本相互作用;而夸克之间还存在一种特有的相互作用,即强相互作用。正是以夸克之间的这种强相互作用为主,决定了脉冲星的组成成分、物质状态、内部结构。所以说,脉冲星既是强相互作用也是弱相互作用的天然实验室。

另外,脉冲星还是一种在强电磁场中检验我们目前已经比较完善的量子电动力学(QED)的重要场所。比如说脉冲星表面的典型磁场可以达到 10^{12} 高斯,个别星体,比如说所谓的超磁星(magnetar)甚至可达到 10^{16} 高斯。旋转强磁场脉冲星因单极感应而产生的电场一般可达 10^{11} V/cm。如果要检验强电磁场中的QED过程,我们就必须借助于脉冲星来实现。事实上,在研究脉冲星磁层中粒子的加速和辐射行为的时候,我们将不得不考虑强电磁场中一些重要的QED过程。

综上所述,对于我们目前已知的自然界四种基本相互作用(引力、电磁、强、弱)而言,脉冲星是集其于一身的极端实验室。显见,脉冲星对于人类探寻自然的本质是极其重要的。这是我想说的第一点。

我想说的第二点就是:脉冲星的应用研究在国家战略上也是不可忽略的。北大前副校长王义遒教授曾经讲过一句话,十几年后的今天我希望转述给各位。他说,我们有很多东西都是从西方进口的,其中包括一样至关重要且我们每天都在用的东西,这就是时间,然而我们往往却察觉不到,这是一件很遗憾的事。“进口时间”意味着什么?你的时间定不准,就意味着你的空间定不准;你所有的制导设备都在定位精度上存在大问题。目前主流的时间标准是依据原子钟的。可喜的是现在部分脉冲星自转周期的长期稳定性已经赶上甚至超过了原子钟,这表明脉冲星或许是潜在的可以替代原子钟的时间标准。未来要真正实现脉冲星时间标准,当然不能依靠一两颗单独的脉冲星而必须建立脉冲星守时阵。“脉冲星钟”的建立任重而道远。



此外,脉冲星发射的非常有规律的脉冲信号,有点类似于 GPS 时间信号,因此原则上可以依据脉冲星信号进行空间定位。GPS 是如何定位的呢?它包括 24 颗卫星绕地球公转,任意时刻我们只要能接收到 4 颗以上的卫星的信号,就可以把自己的位置定准。脉冲星也可类似地看作时钟,当然利用脉冲星也可以用来做导航。其优势在于:不但可以做战争时的导航,而且还可以做星际深空探测(比如在飞往火星、木星等的航天器上使用)。脉冲星导航研究同样需要建立脉冲星守时阵。

可见,脉冲星应用研究关键在于准确测定脉冲周期,必须依赖脉冲星守时阵来实现。而这一应用研究在基础研究上的“副产物”也很惊人,这至少表现在以下两个方面:第一,利用脉冲星守时阵测量宇宙空间的背景引力波。当空间存在背景引力波时,将改变不同方向上脉冲星信号的测得周期;而背景引力波导致的这种“改变”具有特定的角度关联。若能测出这种关联,就可以反过来确定背景引力波的特征。第二,通过脉冲星守时噪声行为研究脉冲星物态与结构。“脉冲星具有准确的时钟信号”只是一种粗糙的说法,实际上脉冲星发出的自转周期本身就存在某种不确定因素导致的微小波动(称为“守时噪声”)。导致守时噪声因素很多,部分因素与脉冲星物态与结构有关。若能分辨出这类守时“噪声”,无疑有助于解决“脉冲星内部结构”这一挑战性问题。

从以上的介绍中我们看到,脉冲星研究这一课题不论在基础研究还是在应用中都占有重要的地位,而且紧密纠缠、互相促进。历史上是否碰到过、研究过类似于“脉冲星”这样研究对象呢?实际上是有的。在人类认识自然的历史中,出现过的一个类似客体,它也同时具有非常重要基础科学意义和战略利用价值,这就是原子核。原子核是非常重要的:它不仅是我们的认识跨越到微观领域的一个非常重要的物质层次,而且与之紧密相连的原子弹及其爆炸改变了人类的战争史和文明史。所以,我觉得原子核和脉冲星研究具有某种异曲同工之处。我曾经多方面对原子核和脉冲星研究作过比较,得到的结论是支持以上这一看法的。因为时间关系,这里就不赘述了。

下面再说说我们的一点新观点和新想法。这几年来我们一直在脉冲星这个领域做研究,包括它的辐射、内部物态等方面。今天我只想谈谈我们关于物态的研究。脉冲星内部的物态和结构到底怎样,其实刚才已经讲了,其回答是

强烈地依赖于人们对于夸克之间基本强相互作用的认识的。从天体物理视角出发,通过研究丰富的各类致密星观测现象,我们提出了在致密星内部的低温夸克物质中应该存在夸克集团(Quark Cluster);当温度足够低时可形成固态夸克物质,而非目前国际流行的“色超导”态夸克物质。

现在一般认为,描述夸克之间强相互作用的基本理论是量子色动力学(QCD)。类似于QED中电荷之间的力,QCD中色荷之间也存在一种色力。形象地讲,色力导致了我們目前所了解的丰富的强相互作用现象。QCD在20世纪60、70年代以来发展很快,具有一些符合实验的特征,其中之一就是所谓的“渐近自由”。2004年的诺贝尔物理学奖就是为了表彰获奖者在QCD的基础上得到了实验上先前发现的渐近自由行为:在高能极限(高温或高密)情况下,夸克是渐近自由的、之间互相作用很弱。然而在低能(温度和密度不是极端高)情况下,夸克之间色相互作用较强,但具体特征如何目前尚未明朗。而恰恰是QCD在低能情形下的行为,对于我们认识自然界是非常关键的。所以美国克莱数学研究所在20世纪到21世纪初立了七个“世纪奖金问题”。现在有一个已经被解决了,就是彭加莱猜想;剩下的六个难题之中就有一个跟QCD低能情况下的性质研究紧密相关。碰巧的是,我们现在要研究的脉冲星物态,与QCD的低能行为非常密切。

在所谓的QCD相图上阐述我们的观点和想法是很方便的。QCD相图刻画

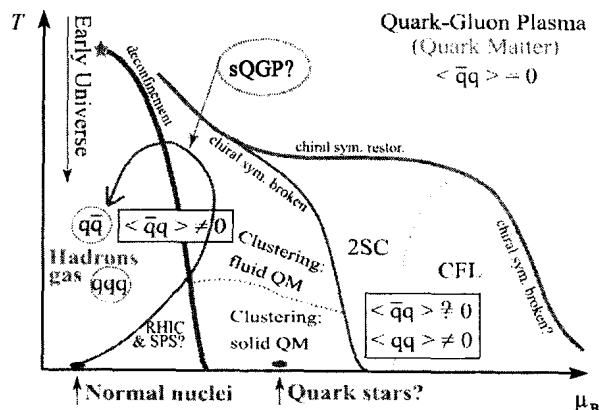


图1 推测的QCD相图

了强作用主导下可能存在的各种物态;横坐标是重子的化学式,或者可以近似看作重子的数密度,纵坐标是温度。因强作用物态本质上涉及QCD的低能行为,所以至今未能从QCD第一性原理出发给出QCD相图,只能根据某些一般性规律(如对称性)来推测;图1即为一例。因渐近自由,在温度或密度足够高的时候,



也就是高能极限下,夸克之间的相互作用可以忽略。所以很早人们就想到,高温或高密情况下可能出现所谓的夸克胶子等离子体(Quark Gluon Plasma, QGP),或者叫夸克物质(Quark Matter)。那么,低能情况下由夸克组成的物质是什么样的呢?原子核就是一例。原子核由核子(质子和中子的统称)组成,而包括核子在内的强作用粒子又称为强子。所以应该有一条相变曲线,把低能情况下的强子相和高能情况的 QGP 相分隔开来(尽管还不知道这条曲线的准确位置在哪)。

在致密天体环境中我们关心的夸克物质都是低温的。因夸克是费米子,若完全忽略夸克之间的相互作用,低温夸克物质可看做费米气。然而夸克之间本身就存在的吸引作用可能导致费米面失稳形成夸克对,所以在较高密度情况下,夸克物质可能出现类似于 BCS 态的色超导。很早就有人提出这样的色超导观念,且这一观点近年来在国际上讨论得很热烈。不过我们的看法是:在密度极高的区域里确实可能存在色超导态,但是现实的脉冲星其实并没有那么高的密度,所以致密星内部可能不存在色超导态,而是我们提出的夸克集团(Quark Cluster)态。尽管在极高密度情况下,夸克物质基态可以近似看做费米气,但 QCD 有一个特点,即:随着密度的降低,夸克之间的相互作用越来越强。所以当密度降低至脉冲星内部密度(只有几倍核物质密度)的时候,由于夸克间很强的相互作用,我们认为应该会形成夸克集团。当然,我们还没能从 QCD 第一性原理出发推演出夸克集团的存在,否则这个猜测就不会再有争议了。更重要的是,我们提出夸克集团态在高温下是流体,但在低温下却是固体。而固体夸克集团态对于我们理解丰富的致密星相关天体物理现象,比如脉冲星的进动、Glitch、SGR 的爆发等,是非常有必要的。

我们提出的这个观点还需要未来的各种观测检验,包括以脉冲星应用为目的而进行大量观测。举个例子,脉冲星守时噪声多种多样,而守时噪声背后隐藏着非常丰富的物理内涵——所谓“新物理埋藏于噪声之中”。若脉冲星内部由夸克集团物质组成,则将具有特定的守时噪声行为;观测上若分辨出这些守时噪声特征将是对夸克集团观念的支持。

袁业飞:

因为你比较关心奇异星在天体物理的环境当中, Piran 曾经写过 *Review* 文章, 提到伽玛暴的贡献者 Pazinsky 的最后一个思想很可能跟奇异星有关, 你对这个观点有什么评价?

徐仁新:

确实 Pazinsky 最后一篇关于伽玛暴的文章发表在 *MNRAS Letter* 上, 其基本思想是这样的: 夸克表面实际上可看做一个膜, 这个膜可以穿透轻子或光子, 但因夸克禁闭不能穿透夸克; 这有助于得到一个干净的伽玛暴火球。这表明他意识到需要夸克表面制造 GRB 的干净火球, 尽管这一想法在他们论文之前就被其他作者所强调。然而 GRB 动力学中的火球是否真得这样形成的, 夸克表面的存在还有什么样更多的天体物理后果, 这些需要未来大量的研究。

毕效军:

你说脉冲星可能存在一个夸克集团态, 还分为固态和液态, 这些有没有办法检验?

徐仁新:

这是一个从物理学角度经常会被提出的问题。从天文学的角度讲, 一个天体是固体还是流体, 差异显然是巨大的。比如说如果地球是液体的、缺乏剪切力支撑其表面的物体, 我们还能在这里开会吗? 最明显的一个差异就是天体自转的进动问题。流体旋转一般是不可能进动的。固体具有刚性, 内部可以积累弹性, 所以它的自转轴未必和惯量椭球的对称轴一致; 当二者不一致的时候, 就产生进动, 甚至自由进动。因此观测一个天体的自转是否有进动, 就可以判断出它倾向于是固体还是流体。另外, 由于固体内部可以积累弹性势能, 固体星球经常会出现星震 (star quake), 比如地球的地震; 而液体是不会具有的。这也是一大差异。



王建民:

在目前的条件下,有没有可能在地面上的加速器实验里得到夸克集团?

徐仁新:

地面加速器中产生的 QGP 是温度比较高的,而致密天体中夸克物质的温度是比较低的。所以为了检验有没有色超导,德国要建一个低温加速器,其温度可以降低到几十个 MeV。但这个温度其实还是太高。因为在脉冲星刚诞生的时候,内部温度大概在 30 MeV 至 50 MeV 范围,而现在,其星体温度已经降到 keV 以下。可见致密星内部与加速器拟建立的低温环境差别还是很大的。所以要在地面实验室中造出和脉冲星上完全一样的夸克集团,我认为是不太可能的。但夸克集团这个概念是可以被实验检验的。夸克集团形成依赖于夸克物质之间非常强的相互作用,但是如何来计算这样强耦合的粒子系统?这个问题还没能解决。大家都意识到极端高密度情况下渐近自由肯定没问题,随着密度的降低相互作用越来越强,这有利于夸克集团的形成。实验检验夸克集团观念的一个办法是:看看实验室相对论重离子碰撞过程中是否会出现类似夸克集团的“夸克分子”。

毫秒射电脉冲星的一种新的形成机制

◎李向东

我今天主要介绍某些毫秒脉冲星可能形成的机制。在射电脉冲星的脉冲周期-周期导数分布图上,主体是正常脉冲星,它们的磁场和周期分布比较集中,典型周期为 $0.1 \sim 2 \text{ s}$, 周期导数 $\sim 10^{-15} \text{ s s}^{-1}$ 。有一部分射电脉冲星属于毫秒脉冲星,其大部分是在双星系统里的,还有一部分脉冲星是具有超强磁场的强磁星(软伽玛射线复现源和反常 X 射线脉冲星)。

通常对脉冲星的演化有这样的观点:考虑到中子星刚刚诞生时具有比较快的自转和比较高的磁场,毫秒射电脉冲星可能起源于原来位于双星系统中的正常射电脉冲星,在它们死亡之后通过和伴星相互作用,自转加快,周期减小到毫秒;而且由于物质吸积,磁场衰减,在物质吸积停止后再次表现为射电脉冲星。这是我们称之为再循环(Recycled)的演化渠道。从观测到的毫秒射电脉冲星的分布来看,再循环脉冲星大多位于具有低质量伴星的双星系统。表 1 给出了双星射电脉冲星的主要分类。从中我们可以看出,部分双星脉冲星具有中子星伴星或者比较重的白矮星伴星,这些系统中的射电脉冲星的周期并不是特别的短,可能属于部分再循环脉冲星。具有低质量伴星的系统由于传输的物质质量比较多,伴星最终演化为 He 白矮星,通常脉冲星周期可以达到毫秒,所以我们通常讲的毫秒射电脉冲星就属于这一类脉冲星。还有另外两类双星系统,脉冲星的伴星或者是正常恒星,或者是先于脉冲星形成的白矮星,这里的脉冲星还没有经历过再循环过程。



表 1 双星射电脉冲星的分类

Main type	Sub-type	Observational examples
High-mass companion ($0.5 \leq M_c \leq M_\odot \leq 1.4$)	NS + NS(double) NS + (ONeMg) WD NS + (CO) WD	PSR 1913 + 16, $P_{\text{orb}} = 7.75$ hr; PSR 1435 - 6100, $P_{\text{orb}} = 1.35$ d; PSR 2145 - 0750, $P_{\text{orb}} = 6.84$ d;
Low-mass companion ($M_c \leq 0.45 M_\odot$)	NS + (He) WD	PSR 0437 - 4715, $P_{\text{orb}} = 5.74$ d PSR 1640 + 2224, $P_{\text{orb}} = 175$ d
Non-recycled pulsar	(CO) WD + NS	PSR 2303 + 46, $P_{\text{orb}} = 12.3$ d
Un-evolved companion	B-type companion Low-mass MS companion	PSR 1259 - 63, $P_{\text{orb}} = 3.4$ yr PSR 1820 - 11, $P_{\text{orb}} = 357$ d

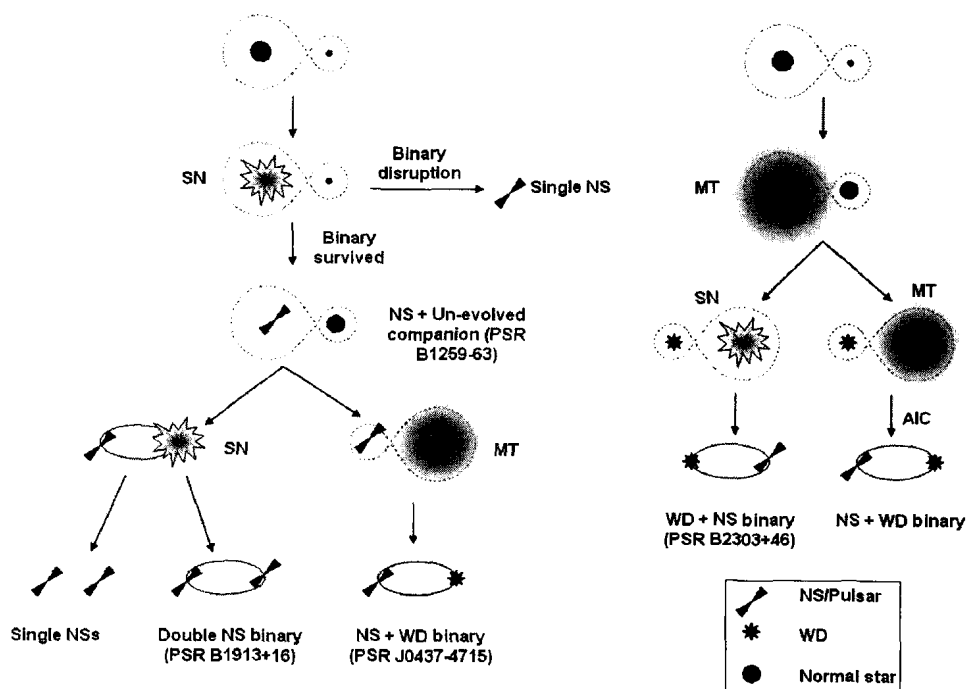


图 1 射电脉冲星的几种可能的形成路径

从演化上来讲,不同类型的双星脉冲星形成渠道不一样(如图 1 所示),有的是先通过双星系统里面大质量恒星经超新星爆发形成一个中子星或脉冲星,然后再跟伴星相互作用形成各种各样的系统。也有特殊的情况:主星先形成白矮星,伴星后形成中子星。不同的演化渠道使得双星脉冲星观测特征丰富多彩,有很大的差异。

最近几年的射电观测带来一些我们意想不到的结果,如最近发现的毫秒射电脉冲星 PSR J1903 + 0327,脉冲周期是 2.15 毫秒,轨道周期 95 天。通过观测大致推测脉冲星质量是 1.74 倍太阳质量,伴星约 1 倍太阳质量。如果从正常演化的角度看,伴星可能还是一个主序星,但是我们看到脉冲星周期已经达到了毫秒量级。最特别的地方是它的轨道偏心率是 0.44,这个具有偏心轨道的双星毫秒脉冲星跟前面通过传统的渠道形成的双星毫秒脉冲星有很大的不同。在一般情况下,由于双星之间物质交流,双星轨道都是圆轨道,很难想象毫秒脉冲星具有一个偏心轨道。偏心轨道是怎么形成的呢?通常有两种途径,一种是由于超新星爆发不久,中子星受到 kick(踢出),所以原来的圆轨道受到扰动,变为偏心轨道。第二种可能是受到动力学的影响,比如说恒星之间的碰撞、第三天体的影响等。PSR J1903 + 0327 的发现给毫秒脉冲星形成的研究带来了新的挑战,就是为什么这个脉冲星系统的大部分观测特征跟其他双星毫秒脉冲星系统很相似,但是却有非常大的偏心率。

对偏心轨道形成的可能解释如图 2 所示,它们都是假设这个脉冲星产生于一个球状星团,用前面所讲的动力学的作用来影响轨道偏心率。例如,三星模

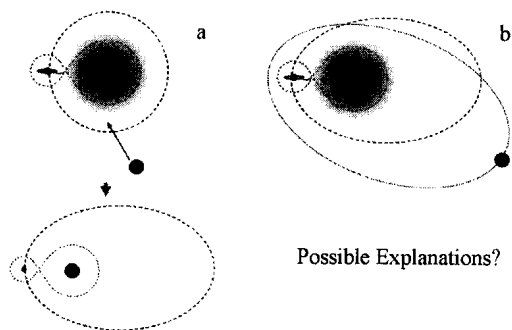


图 2 PSR J1903 + 0327 的三星形成途径

型假设中子星与伴星的相互作用形成了毫秒脉冲星,但是在这个伴星外面还有第三个看不见的天体,以偏心轨道绕里面的双星轨道转动,而光学看到的是内双星系统的伴星,所以射电和光学观测实际上是看到了三个天体,一个是脉冲星,一个是光学观测看到的内双星系统中的伴星,一个是偏心轨道所对应的第三天体。当然这需要许多的巧合因素。另一种模型假设射电脉冲星通过物质吸积形成毫秒脉冲星之后,通过辐射的方式把内轨道的伴星蒸发掉了,只留下原来第三天体在偏心轨道上作为伴星。

但是我们看到 PSR J1903 + 0327 有几个基本特征和刚才提到的三星模型不相符的。第一,它是在银盘里面的系统,没有任何处于球状星团里面的证据。第二,它的伴星质量达到了一个太阳质量,如果说曾经发生过物态交流,那么伴星应该是白矮星,质量应该大约为太阳质量的一半。这两个特点都暗示着这个脉冲星并不是通过通常的再循环渠道,而可能生来就是一个毫秒的射电脉冲星。这和传统的理论有比较大的差别,一般来讲,射电毫秒脉冲星是可能直接形成的,但它的磁场通常是强磁场。但 PSR J1903 + 0327 诞生的时候可能就同时具有快速的自转和弱磁场(它的磁场在 10^8 高斯左右),即所说的 Born-Fast 机制。

曾经有人提过 Born-Fast 这个观点,但是没有观测资料的有力支持,当然它并不是完美无缺的,因为跟观测还是有一些差异。如果说有些毫秒射电脉冲星诞生时确实具有这些特点,现有的观测资料似乎与此矛盾。比如说在年轻的超新星遗迹中没有看到一个类似于 PSR J1903 + 0327 这样的弱磁场中子星(当然这并不是这颗脉冲星的问题,而是整个脉冲星形成的理论问题,因为目前在年轻的超新星遗迹中只找到了很小一部分脉冲星)。还有我们看到一些孤立的毫秒的脉冲星,它们和双星系统中的脉冲星无论在空间速度还是在自转分布上都是非常相似的,说明它们之间本身就是同样的演化渠道,也是通过物质交流过程形成的。如果说它们其中有一小部分刚刚诞生就开始快速转动,很显然它们就应该有比较快的运动速度,但还没有这样的观测证据。此外,从磁场大小来讲,我们还没有在年轻脉冲星中探测到比 10^{10} 高斯更低的磁场。

怎么样去既能够解释 PSR J1903 + 0327 的观测特点又避免相应问题呢?我们考虑了一种可能的机制,假设中子星在诞生的时候具有正常的磁场和自转

周期,但是在中子星诞生的时候一部分超新星抛射物可能会形成一个围绕中子星的回落盘(debris disk)并影响到它的演化。在中子星吸积回落盘物质的过程中,可能经历磁场衰减和自转加快的过程。

表 2 模型计算参数

Model	α_{CE}	$M_0 (10^{-5} M_{\odot})$	$R_{d,8}$	$M_{d,low} (10^{-5} M_{\odot})$	$M_{d,upp} (0.1 M_{\odot})$
A	1	1	1	1	1
B	3	1	1	1	1
C	0.5	1	1	1	1
D	1	10	1	1	1
E	1	1	0.1	1	1
F	1	1	1	3	1
G	1	1	1	1	0.5
H	3	1	1	3	1
I	0.5	10	0.1	1	0.5

我们建立了相应模型来研究这样的可能性,表 2 给出了对应模型的参数,这里说一下回落盘的质量上限和下限,盘质量的大小跟中子星的爆发或者说前身星有关。一般说来,如果中子星产生于核坍缩超新星,盘的质量会非常小,影响也非常微弱。但是有一部分超新星并不是核坍缩导致的,而是通过电子俘获过程产生的,对应的前身星质量大约在 10 个太阳质量左右,这时回落物质的质量就比较可观。另外如果恒星初始质量特别大的话,比如说超过 20 倍太阳质量,坍缩导致的超新星的回落盘通常也会比较大。比如说在伽玛射线暴中就通常需要相对大的回落盘。

表 3 列举了对应不同模型的最后计算结果。给定前面初始参数的分布,我们可以大致估算出银河系有多少这样的脉冲星的数目。表中 MPSR-LMS 表示毫秒脉冲星和低质量主序星构成的系统,大概在银河系有几百个左右;NS/BH-MPSR 表示毫秒脉冲星的伴星已经演化成了中子星或者黑洞,它的数目可能有上千个,诞生率是 $\sim 10^{-6} \text{yr}^{-1}$ 。最后也有相当一部分系统在超新星爆发时轨道瓦解掉,或者天生就是一个单星,它们的数目更多,在银河系可能有几十万个这

样低磁场同时快速自转的毫秒脉冲星。所有这些脉冲星不是通过所谓的再循环方式,而是通过超新星爆发直接产生的。

最后简单总结一下。通过回落盘吸积的作用也许能自然地解释 PSR J1903 + 0327 的一些观测特性,不需要考虑在球状星团里的动力学影响就可以解释它的快速转动、弱磁场和偏心轨道等特征。通过星族合成可以大致预言,在银河系里面,有相当部分的孤立毫秒射电脉冲星的形成不必经过再循环过程。

表 3 计算结果

Model	Item	MPSR-LMS	NS/BH-MPSR	Single MPSR
A	Number	203	3.3×10^3	1.5×10^5
	Rate	6.0×10^{-7}	3.1×10^{-6}	3.1×10^{-4}
B	Number	751	3.7×10^3	1.6×10^5
	Rate	1.3×10^{-6}	4.0×10^{-6}	3.2×10^{-4}
C	Number	192	3.1×10^3	1.5×10^5
	Rate	6.5×10^{-7}	3.0×10^{-6}	3.1×10^{-4}
D	Number	8	1.4×10^2	1.2×10^3
	Rate	6.2×10^{-7}	3.3×10^{-6}	2.7×10^{-4}
E	Number	83	1.3×10^3	4.9×10^4
	Rate	3.9×10^{-7}	2.0×10^{-6}	1.9×10^{-4}
F	Number	232	3.7×10^3	1.7×10^5
	Rate	6.9×10^{-7}	3.5×10^{-6}	3.4×10^{-4}
G	Number	28	4.5×10^2	1.2×10^4
	Rate	3.5×10^{-7}	1.7×10^{-6}	2.0×10^{-4}
H	Number	856	4.2×10^3	1.8×10^5
	Rate	1.5×10^{-6}	4.5×10^{-6}	3.6×10^{-4}
I	Number	0.3	7	38
	Rate	9.9×10^{-8}	4.6×10^{-7}	3.9×10^{-5}

徐仁新:

Born-fast 这个观点可能有两个问题,第一个就是中子星的快速自转,一般来说毫秒脉冲星的温度比较低,可以转得很快。但是脉冲星刚形成时温度比较高,体洛伦兹系数比较弱,会很快有一个激发,通过引力波把角动量损失掉,这就是很早大家不怎么相信 Born-fast 这个原理的原因。第二个就是回落盘,吸积开始的时候吸积率肯定很大,但它不可能永远很大,它肯定是慢慢减下来,吸积率低到以至于磁层半径大于共转半径的时候吸积不是加速了,而是减速,所以残留下来不一定是吸收角动量,说不定还有损失的角度。

李向东:

第一个问题是引力辐射的问题,你讲的对,但是对周期为几个毫秒的脉冲星,我认为引力辐射并不是问题,比如说周期在 1 毫秒或者 1 毫秒以内也许会影响会比较大,但对几个毫秒的脉冲星引力辐射的影响并不是特别大。

徐仁新:

我补充一下,以前有人算过,大概 5 毫秒,最少 3 毫秒,但是你研究的这个对象是 2 毫秒。可能理论上还是有点困难。

李向东:

理论计算是一回事,但是理论正确与否需要通过观测去检验。你讲的第二个问题也是对的,回落盘可能会加速中子星,可能也会减速,所以只有很小一部分质量比较大的回流盘可以产生足够的加速使中子星达到毫秒量级,接下来的减速过程不是那么重要,所以真正成功达到毫秒的只有一小部分,绝大部分仍是正常的脉冲星。

林 隼:

中子星的外部磁场结构是什么样的?



李向东:

中子星磁场的结构应该说还不是很清楚,因为从射电观测来看,磁场结构非常复杂,可能有多极场,但是从大的尺度来讲,可能还是偶极场占主导地位。

林 隼:

脉冲星的整体磁场是偶极场,但局部的磁场的结构会不会发生一些演化?如板块运动会不会造成发生类似于太阳上发生的一些磁活动来解释一些新的、没法解释的现象?

李向东:

在1989年Ruderman就有这样的观点,中子星板块运动造成磁场位形的变化,从而改变磁矩的大小,但是这个观点还没有得到主流学术界的承认。

林 隼:

在关于磁场演化观测和理论研究当中有没有讨论过可能会发生的现象和结果?

李向东:

对中子星来讲,磁场演化是一个很长的过程,很难从比较短的时间里面去判断变化,更多是从统计上来看,比如说年轻的和年老的、经历过吸积的和没有经历过吸积的脉冲星之间磁场的统计性质,利用这样的方式去推测它的演化,但是这些理论也很不成熟,有的认为磁场是起源于中子星壳层,有的认为是起源于核。

林 隼:

磁场演化大概有多长时间。



李向东:

曾经有人认为是 10^7 年,现在大家更接受的观点是 10^9 年或更长的时间。

彭秋和:

在你们的模型中有没有可能导致新的白矮星形成。

李向东:

这也有可能,但是白矮星吸积塌缩所抛射的物质太少不会产生比较大的偏心率。



会议时间

2009 年 7 月 17 日 下午 14:00 ~ 18:00

会议地点

昆明连云宾馆礼堂西四厅

主持人

王建成



脉冲星磁层中波的传播效应

◎王 陈

今天我主要介绍一下脉冲星磁层中各种辐射的传播效应。首先谈一下背景,然后介绍几种典型的传播效应以及我们在这些方面所做的工作,最后介绍我们对波在磁层中传播的数值模拟研究。

我们都知道光子产生于脉冲星的内磁层或星体表面,例如对射电辐射,辐射高度可能从几到几百个中子星半径;对 X 射线,认为它来自星体表面。光子初始的时候一般认为是线偏振,处在 O 模或 X 模上(O 模即偏振面处在磁力线的平面上,X 模即偏振面垂直于磁力线所在平面)。光子向外传播时要穿过脉冲星的磁层。而磁层有很强磁场,一般认为大尺度上脉冲星磁场是偶极场,但是在接近星体表面(几个中子星半径)有可能会多极磁场,表面磁场强度可以是 10^8 高斯(毫秒脉冲星) $\sim 10^{15}$ 高斯(磁星)。另外,磁层中还充满相对论流动的电子—正电子对等离子体。在开放磁场线区域,电子和正电子都沿磁力线流动,但其洛伦兹因子不知道,约为 $10 \sim 10^6$,可能有一点点不同。等离子体的密度也不知道,最低可能到 $1N_{\text{GJ}}$ (Golden-Julian 密度),高的可能到 $10^5 N_{\text{GJ}}$ 。光子在磁层中传播时,会受到磁层中相对论流动的等离子体的影响,其偏振状态可能会受到很大的影响。我们的问题是最终状态和初始状态相比有多大的改变。

要回答这个问题,首先我们要弄清楚在这些参数和磁层环境下对辐射有可能产生影响的几种传播效应:波模耦合、回旋吸收、真空共振、准切点效应等。对波模耦合,假如光子刚刚产生,在磁层中开始传播,如果磁层中等离子体的各项参数变化比较缓慢,则光子处在绝热演化阶段。在这个阶段中,光子将维持其初始时偏振模式,它的偏振面会随着磁场方向的变化而变化,当传播到比较靠外的時候,由于脉冲星旋转速度的增加,在一定半径处,绝热条件不再满足,这个半径称之为“偏振冻结半径”。在这个半径之后,光子的偏振状态不再变化。波模耦合效应的影响主要有:①波模耦合可以产生足够强的圆偏振,这可以很



容易的解释脉冲星观测现象中强圆偏振现象。②偏振冻结半径处磁场状态决定了光子的最终偏振状态。

另外一种普遍的效应就是回旋吸收效应,发生条件是光子频率等于回旋频率 $\omega' = \frac{eB}{mc}$ 。我们都知道,任何一个电磁波都可以分解成左旋和右旋圆偏振光。对右旋圆偏振光,它会被电子吸收,因为电子在磁场中是右旋的;反之对左旋圆偏振光,它会被正电子吸收。如果磁层等离子体中电子和正电子流是对称的(密度、速度相同),则最终对 I、Q、U、V 的吸收比例是相同的。即只影响总强度,不影响偏振状态。如果电子与正电子流微弱的不对称,如 $N_e \neq N_{e+}$,左右旋圆偏振光光深不同,经过回旋吸收后,可以产生微弱的圆偏振,假定光子初始 100% 线偏振,则经过不对称回旋吸收后,可以估计出产生的圆偏振,是速度和密度之差的函数。

下一种讨论的是真空共振效应。电磁波在磁层中的传播受两种介质影响,一种是相对论流动等离子体,另一种是真空激化效应(QED),即在磁场比较强的情况下,真空并不是完全的真空,量子电动力学效应会引起真空极化。对于强磁场和高频波,QED 是主导,但是弱磁场和低频波,等离子体是主导。在传播中某个地方两种影响相互抵消,产生真空共振,穿过该处时的光子偏振状态可能会改变。我们研究了真空共振发生的条件,以及真空共振导致的模式变化。如果演化是绝热的,那么偏振方向会发生一个 90 度的偏转;如果是非绝热的,则不会发生。现在来看真空共振效应的影响。研究发现,在射电波段,光子穿过真空共振点时总是非绝热的,因此偏振状态不发生变化,基本上没有影响。产生于中子星表面的 X-ray 光子在中子星大气中会受到真空共振的严重影响,X-ray 光子的偏振状态受到真空共振效应的强烈调制。光学和红外光子可能在磁层中受到真空共振的影响,这有待于研究。

另外一种新发现的有趣的效应叫准切点效应。假定波矢 K 的传播方向和磁力线在一个平面里,一定会发生一个切点,这个点上,波矢 K 和磁场 B 的夹角 $\theta_{KB} = 0$ 。在切点附近,垂直于 K 的磁场 B_{\perp} 就会发生一个 180 度的突变。但更普遍的情况是由于中子星的旋转,波矢 K 不在磁力线平面内,只存在准切点,准切点处 θ_{KB} 不为零但达到最小值。切点前后 B_{\perp} 连续变化 180 度,在这个连续变化过程中会发生准切点效应。一些中子星表面辐射的 X-ray 光子在穿过准



切点时,因为偏振面来不及跟随磁场方向的快速旋转,从而发生模式之间的耦合。对非绝热演化,磁场方向变化太快,偏振面来不及改变就已经穿过准切点了。而对于绝热演化,磁场方向变化太慢,偏振面一直随着磁场变化而变化,穿过准切点后恢复到原来偏振状态。对于中间状态,磁场方向变化适中,穿过准切点后偏振状态发生变化。准切点效应总体效果是削弱了 X-ray 辐射的总线偏振强度,最高达到可达到 50%,但是总流量及圆偏振没有变化。各种传播效应对辐射的影响总结如表 1:

表 1 各种传播效应对辐射的影响

	作用波段	对总强度的影响	对线偏振的影响	对圆偏振的影响	对谱的影响
波模耦合	Radio-X-ray	无	有	有(可以产生足够大的 V)	无
回旋吸收	Radio-X-ray	有	有(e, e^+ 不对称时)	有(e, e^+ 不对称时)	有
真空共振	X-ray (optic/IR 也有可能)	$B > 10^{15} \text{ G}$ 有	有	有	$B > 10^{15} \text{ G}$ 有
准切点效应	Radio-X-ray	无	有(削弱)	无	对偏振谱有影响

我们前面讲了很多传播效应,光子经过这些传播效应后总的偏振状态改变是什么样的呢?有些传播效应前后偏振状态的变化很难用解析的形式表示。还有些效应发生的区域接近,互相耦合在一起。因此很难通过单独研究各效应影响再叠加的方法研究各种传播效应的总影响。我们用数值模拟的方法可以很好地解决这个问题。我们可以把所有的传播效应都体现电磁波在传播介质里的介电张量中。介电张量是由磁场、等离子体密度和速度等参量决定的。如果我们知道光子初始位置和偏振状态,及磁场等各特性参数的分布,结合几何模型,就可以通过积分辐射传播方程给出光子的最终偏振状态。这个最终偏振状态是由各种传播效应的综合作用确定的,与初始状态可能偏离很大。

模拟结果显示传播效应对脉冲星总强度和偏振轮廓都有影响,其影响的强度取决于脉冲星和磁层中等离子体的各项参数。其对脉冲星辐射轮廓的影响有:①总强度有一个吸收。这是由回旋吸收造成的。有趣的是吸收系数(或光深)与相位有关系,近似为线性关系。②有较强的圆偏振产生。初始的辐射是



100%线偏振的,但由于波模耦合以及准切点效应,而产生了圆偏振。③偏振位置角的轮廓与标准旋转矢量模型(RVM)预言的S形曲线有一定的偏离。偏离的多少及形状的变化取决于视线与磁轴的最小夹角 χ ,以及等离子体的密度速度等。对特定的 χ 角,偏振位置角会在某个相位上发生 90° 的跳变,类似于观测到的垂直模式现象。这些模拟结果可以很好地解释一部分观测现象。比如某些非高斯的单峰脉冲就可以用高斯加随相位不同的吸收来解释,而不是像以前认为的用多个高斯成分拟合。脉冲星偏振观测发现对 conal-double 脉冲星,其圆偏振符号与偏振位置角的变化密切相关。而这个关系可以用波模耦合产生圆偏振来完美地解释。还有脉冲星 J1920 + 2650 的垂直模式现象与我们的模拟结果非常类似,即 90° 度跳变点与圆偏振最大值重合。

以上模拟工作用的是较为简单的简化模型,未来我们还将进一步考虑复杂的实际模型,如考虑辐射高度随相位的变化,考虑等离子体密度和速度的分布,与辐射机制相结合考虑不同的初始偏振状态。我们还可以研究脉冲星单脉冲和子脉冲的传播效应问题,因为它们更能反映脉冲星射电辐射的本质过程。

袁业飞:

X射线是从表面上来的,是不是热辐射?

王 陈:

是热辐射。

袁业飞:

为什么一开始就假设是O模或X模呢?

王 陈:

研究表明X射线在中子星表面或大气层的深处产生。由于大气层中真空共振效应,X射线的偏振会受到很强的调制,O模和X模的光深不一样,X模传不出去,只有O模能传出去,或者恰好相反。在不同磁场限制下产生不同模式的光,所以发射出来的都是偏振的。



伽玛射线脉冲星高能辐射模型的几个问题

◎张 力

本文主要介绍目前伽玛射线脉冲星高能辐射的主要模型及现在存在的问题。我们知道首先 SAS-2、COS-B 观测到了 Crab、Vela 脉冲星的伽玛射线辐射, 后来 EGRET 观测到 6 颗高置信度伽玛射线脉冲星, 最近 AGILE 观测到了 7 颗高置信度和 13 颗可能的伽玛射线脉冲星。Fermi LAT 在其前六个月的观测中, 给出了 46 颗高置信度伽玛射线脉冲星, 其中 6 颗是已知的 EGRET 源, 24 颗是已知的射电(或 X 射线)脉冲星(期中包括 8 颗毫秒脉冲星), 而 16 颗是未知的, 由 Fermi 首次探测到。

高能辐射模型大致分为三类, 一类是极冠模型(polar cap), 一类是外间隙模型(out gap), 另一类是由极冠模型衍生出来的狭长间隙模型(slot gap)。从目前的研究现状来看, 三类模型大致都可以解释 EGRET 的观测结果, 如解释 Crab 的位相平均能谱。从唯象的角度来看, 可以知道一些伽玛射线脉冲星的性质, 如转动能(即 spin down power)转化为伽玛射线的效率大致有这样的关系 $E_f \propto \dot{E}_{psr}^{1/2}$; 另外高能截断很有可能与中子星表面磁场联系在一起, 目前只给出了 EGRET 得到的大致趋势。所以, 期望 Fermi LAT 给出更多的数据, 新的检验需要新的数据, 最好的一种方式就是通过把多波段的数据结合起来进行研究。

我们现在来看 γ 射线辐射模型, 模型基本的参数主要是角速度 Ω 及其变化率 $\dot{\Omega}$, 通过这两个量可估计出自转变慢功率、特征年龄、极冠半径、光柱半径、表面的磁场强度等。狭长间隙模型主要是由极冠模型衍变出来的, 在极冠加速器中, 电压沿极冠表面附近和之上的场线发展起来, 形成加速区域。有两种这样的模型, 一种是真空间隙模型, 另外一种空间电荷受限流动模型(SCLF 模)。这两个模型的差别是中子星表面边界处电荷密度不同, 分别为 0 和 ρ_{cJ} 。对极冠模型而言, 在中子星表面有大概可以达到 3~6 个的中子星半径的加速



区域,该模型给出的光变曲线中间没有“桥”辐射成分,这是它最大的问题。

在极冠加速区的几何中,假定沿最后一条开场线平行于磁场方向的平行电场 E_{\parallel} 为零,则在这样的开场线附近,应该是 E_{\parallel} 减少,所以极冠边缘的弱平行电场使得对形成面向外运动,形成了狭长间隙。间隙沿着最后一条开场线增加使得加速区增加,所以可给出三维图像,一直从中子星的表面延伸到接近光柱半径处,由此形成的模型的光变曲线也可以延伸出来,所以由此做出来的光变曲线比较好。

下面主要介绍真空外间隙模型,传统的外间隙模型是 CHR 模型,整体结构比较简单。首先计算了垂直磁场方向的电场分布情况,也考虑了在厚度方向上的电场分布情况,可以解泊松方程,给出在垂直磁场方向的电场分布,所以人们就利用了这样一个近似的真空间隙内的平行电场,取最大值作为加速电场的近似。我们后期发展的模型基本上就用典型的最大的电场来处理。从 1999 年以后,有一类非真空外间隙的模型,这个模型由 Hirotsu 及合作者提出,它不管垂直于磁场方向的电场,而且假定间隙厚度作为自由参数,可以随意调整,假定粒子可以自由出入间隙的内外边界。就是说它可以从间隙的内部到外部自由进入,但是作为参数来处理。在这两个假定之下,计算出 E_{\parallel} 沿磁场线方向的变化。这样的一维非真空外间隙模型,一个最大的缺点就是加速区沿磁场线太短,不可能很好地解释所谓的 phase-resolved 谱。后来他们进一步发展了二维非真空外间隙模型。我们仔细分析了这样的模型以后,发现实际上外间隙的上边界可以由一个简单的物理效应来限定,所以我们修正了它最基本的参数,把外间隙垂直于磁场线的高度作为自由参数这一假定不要,直接用电子对产生过程来限定它,得到了结果,可以很好地解释观测结果。对 Vela 脉冲星,我们采用的是最近 Fermi LAT 给出来的数据,它的高能段绝对不是超指数截断的,而是正常的指数截断。所以,这一点可能对极冠模型有一定的挑战。当然对能谱的解释不是关键,关键的是电场的结构,当采用不同的参数,得到的电场可以一直延伸到光柱半径,这样就得到了典型的 CHR 模型给出的假定,即加速区从零电荷面一直延伸到光柱半径,当时的结果主要通过简单的假定磁通量守恒得到。只不过我们给出的电场结构不同,随半径的增大,电场一直往下掉。有了这样的改进,我们再做三维模型就没有任何问题了。

2000年,我们就做出了三维辐射模型 CRZ, Tang 等人 2008 年发表了一篇文章,其三维模型与 2000 年我们的模型唯一的区别在于,CRZ 是有单极的,一个 pole 向外辐射, Tang 2008 年的模型有双极的辐射,它吸取了 Hirotani 的工作,把加速区内边界往中子星表面推了,形成双极的辐射,另外考虑了所谓的残余的曲率光子,但是它有一个问题,由于参数是随意选取的,最佳拟合时可以选择各种各样的参数。最近我们在这个模型基础上加了一个合理的参数的选择,做了改进,很好地解释了 Crab 脉冲星大于 25 GeV 的光变曲线,给出了 phase-averaged 能谱。

最后,不管是这三类模型有多少是成功的,实际上存在的问题很多。这三类模型大致都能解释脉冲星高能辐射的一些特性,但粒子在何处、如何被加速?这是现在还没有搞清楚的。另外,粒子是如何、怎么相互作用产生 γ 射线的?而且对所有的中子星这些过程是否都是相同的,且复杂的环境如何影响观测到的辐射模式?对于检验模型,我们希望用 AGILE 和 Fermi LAT 的观测数据来检验,据原来的估计, Fermi LAT 至少可以得到一百多颗 γ 射线脉冲星,那么 γ 射线脉冲星的家族就扩大了,因为 Fermi-LAT 的灵敏度更高,这样就可以提供解释脉冲星磁球层的加速区位置、几何结构以及相互作用区的重要信息。相位分辨谱在这三类脉冲星模型当中也很不同,如果可以仔细给出来,我相信对检验三类脉冲星模型也是一个方法,还有毫秒脉冲星的检验也是重要的。高能谱截断已被认为是极冠和外间隙模型之间的有价值的鉴别器,单从高能谱的截断来看,我估计内间隙模型是有一定问题的。

李向东:

现在讲了好几种模型,有没有可能一种模型来解释射电、光学、伽玛射线全波段的辐射?

张 力:

本来是 polar cap 模型,但是它的观测数据有的时候还是有一些问题,比如说是在射电波段测到的光变曲线,但是在伽玛波段测量可以发现有的时候是重合,有的脉冲星不能重合的。那么,如果从射电一直解释到伽玛的

话,就不对了。因为它有一个相位的移动,这个相位的移动本来就导致疑点,前几年在 EGRET 时期,外间隙模型预期一个相位差,表明 γ 射线产生区和低频的低能的射电产生区应该是不同的,如果是相同的话,应该是同位相的。所以到目前为止,没有任何一个模型能够从射电一直解释到高能段。Harding 研究组希望利用 Slot gap 从射电一直解释到高能段,现在如果外间隙的内边界可以往里面推的话也差不多可以解释。

徐仁新:

我们也一直关心从射电到伽玛波段的辐射,从观测上来看,射电非常倾向于是是一个 polar cap 模型,这几乎是毫无疑问的,但是到了高能的时候就涉及许多问题。乔国俊老师提出了 annular gap 模型,把外间隙往里推,内间隙往外推,但是乔老师的模型与 slot gap 模型还是有差别的,得到的从射电到高能辐射还是不错的。



伽玛暴的中心引擎

◎袁业飞

我这里主要介绍伽玛暴中心引擎相关的一些工作。伽玛暴的中心引擎实际上是一个很重要的问题,虽然说伽玛暴的激波火球模型取得了很大的成功,但是这个火球怎么产生的一直是一个问题。

我先简单介绍目前比较热的、Swift 发现的最大红移的伽玛暴 GRB 090423 的发现过程及相关情况。这个伽玛暴发现的日期是 2009 年 4 月 23 日,一些光学和红外望远镜随后对它立即进行了跟踪观测。光学观测一开始没有看到的是它的余辉,很多人已经猜测它可能是高红移的。后来红外望远镜的的确确看到了它的余辉,而且看到了由于中性氢共振吸收所产生的 Gunn-Peterson 效应,据此,定出它的红移是 8.1~8.2 左右。GRB 090423 这个目前所看到的最远的源的基本特性如下:①观测到的 T_{90} 是 12.2 秒,归算到共动坐标系的话不到 2 秒;②它的流量大概是 $6.5 \times 10^{-7} \text{ erg/cm}^2$;③红移 $Z \sim 8.0$;④年龄 = 0.652 Gyr,大概比宇宙的 1/20 还要早,我们现在的宇宙年龄是 13.666 Gyr,所以那个时候的宇宙还处于婴儿时期;⑤光度距离 $D = 82293.1 \text{ Mpc}$;⑥各向同性的能量大概是 $E_{15-100 \text{ keV}} = 5.27 \times 10^{53} \text{ erg}$ 。

很有意思的是 GRB 090423 符合 Amati 关系,这个关系主要是一些长暴满足的关系。伽玛暴的长短暴是以 2 秒来分界的,虽然它在共动坐标系里面的时间不到 2 秒,但是它有很多的特性,暗示它可能是一个长暴。从它的光变曲线可以看出,它的光变曲线和很多长暴的光变曲线非常相似。最主要的是它的红外观测,从红外光谱可以明显看出 Gunn-Peterson 效应,估算得到红移大概是 8.1 左右。还可以把它的氢的柱密度测出来 $N_{\text{H}}(z) = 6.8 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$,它的消光不是很厉害,人们据此得到它的金属的丰度应该大于太阳金属丰度的 4%,也就是说虽然它是一个非常早的天体,大概在宇宙的 1/20 年龄的时候形成,但它



已是第二代恒星的产物。这对现有的结构形成、宇宙再电离、伽玛暴的起源等模型是一个非常严重的挑战。

对于火球激波模型,最主要的问题是火球是怎么产生的。基本图像是:在非常致密的区域有一个中心能源,该中心能源,即所谓的火球产生的时候是非常光学厚的。如果火球的运动不是相对论性的,来自它的辐射理论上应该是一个黑体谱,但是观测到的伽玛暴的辐射看到的是一个非热谱,这就要求火球必须做相对论性的运动。火球中一般存在少量的重子物质,在火球的膨胀过程中,火球的能量转化为重子物质的动能,但是重子的辐射效率是很低的,把动能转化为电磁能就需要激波加热。这是火球模型的基本框架,这个框架说明激波和星际介质相互作用,通过内外激波解释伽玛暴的光变曲线及其余辉观测。早期的余辉观测也暗示它的中心引擎可能是长时间不断活动的,这个理论模型对伽玛暴的中心引擎也是一个很重要的观测上的限制。

对伽玛暴火球模型限制的观测有很多,如伽玛暴与超新星遗迹的成协,如 SN 1998bw 与 GRB 980425 成协,其他几个伽玛暴的光变曲线中也存在“鼓包”,它可能是超新星的成分。很可能伽玛暴与大质量恒星的演化晚期有关系,而按现在主流观点来看,与超新星成协的伽玛暴应该是长暴。还有其他的例子,如长暴大都存在于恒星形成区,这也是个很重要的证据。长暴目前比较接受的模型是大质量恒星演化到晚期,如果回落物质的角动量在一定范围内则可能形成伽玛暴,并不是所有超新星爆发都会产生伽玛暴。

另外一种模型就是所谓的中子星并合,它主要用来解释短暴。理论上用大质量恒星演化到晚期解释长暴,双中子星并合解释短暴。双中子星由于相互绕转会产生引力波辐射,轨道会缩小,不管是否产生伽玛暴,这总是一个问题,两个中子星相碰时,到底产生什么天文现象?很多人认为产生伽玛暴。双中子星并合产生短暴也是有些观测证据的。人们在观测之前就提出这样的问题:怎么检验长暴和短暴?因为短暴是两个双中子星的并合,那肯定是发生在恒星演化的晚期,两次超新星爆发形成两个中子星,这两个中子星靠引力辐射损失能量。中子星可能在星系的中心诞生,超新星爆发时候会产生“踢出(kick)”速度,由于中子星并合的时标很长,它会从星系的中心跑到星系的外围去。Swift 很重要的观测之一就是发现有一些伽玛暴在星系的外围,和人们的期望是一致的。

短暴主要就是两个中子星或者中子星黑洞并合产生的,但并合之后到底怎么产生辐射?从简单的能量要求来说可能是够的,具体怎么把能量转化为辐射是人们比较关心的问题。不管是长暴还是短暴,都需要能量的释放,怎么把都中心产生的黑洞的引力能或者黑洞自转能变成火球的能量。相对来说人们比较接受是黑洞的超吸积模型。

超吸积模型的要点是:大恒星演化晚期中心先形成一个黑洞,双中子星并合也会在中心形成一个黑洞。有黑洞就会形成吸积,伽玛暴本来就是很极端的天文现象,所以这就要求伽玛暴火球的能量产生机制也是很极端的。从它的爆发时间和能量要求,中心黑洞的吸积率大概是每秒一个太阳质量这样极端的吸积率。另外,吸积盘的区域大概是 $100 \sim 10^4 \text{ km}$ 。进一步我们很容易估算,这是一个非常奇特的吸积盘,它的密度从外围到内区是 $10^4 \sim 10^{13} \text{ g cm}^{-3}$,非常接近中子星壳层的密度。而且由于主要靠引力能释放,袭击盘的温度高达 100 MeV 。在如此高的密度 ($> 10^6 \text{ g cm}^{-3}$) 下,就会发生逆 beta 过程 $p + e \rightarrow n + \nu_e$, 出现富中子化过程。另外温度高于电子静能 ($T > m_e \sim 0.5 \text{ MeV}$), 在这么高的温度下,光子是光学厚的,光子—光子碰撞形成正反中微子。中微子有可能是光学薄的也有可能是光厚的,在大部分区域是光薄的,光薄的中微子会从超吸积盘上辐射出来。从盘的两边出来的两个正反中微子发生碰撞,会产生正反电子对。正反电子对以中微子为媒介 ($\gamma + \gamma \rightarrow e + e^-$), 把黑洞吸积的释放的引力能或者黑洞的转动能转化为正负电子对的能量,也就是转化为火球的能量。这是黑洞超吸积过程的主要特征。

要研究如此高密度下黑洞的吸积,吸积物质的物态很重要,类似于研究恒星时物态很重要一样。要决定物态最简单的假设就是其成分包括中子、质子、正负电子对、中微子、光子,还有某些氦原子核。成分定下来之后,状态方程主要由各个粒子的化学势所决定。如果中微子透明的,我们得到一个化学平衡的条件 $\mu_p + 2\mu_e = \mu_n$ 。严格来说它应该是反应平衡,是所有中子变成质子的反应率等于质子变成中子的反应率,这是一个非常复杂的数值等式。这是在中微子光学薄的条件下的一个比较好的、近似的化学平衡条件。如果中微子光学厚呢?很简单,光学厚中微子不出来,系统处于热力学平衡系统,这个热力学平衡系统两边化学势相等 $\mu_p + \mu_e = \mu_n$, 这里假定 $\mu_{\nu_e} = 0$ 。其实中微子化学势不一



定等于零,不能够简单这么假设,但是在大多数环境里面,没有更好的办法,为了简单起见,我们大都是这样的假设的,在这样的假设下,囚禁的正反中微子的数目是相等的,这是在高温条件下比较好的一个近似。现在我们有二个化学平衡条件,一个是中微子光学薄的,一个中微子是光学厚的。卢炬甫老师他们组用了一个桥梁公式 $\mu_n = \mu_p + (1 + e^{-\tau})\mu_e$,该桥梁公式把前面两个极端条件光滑的联系起来,可用来处理中间过程。从微观的反应平衡角度来验证一下这样的猜测好到什么程度,这是我们正在考虑的一个问题。

我们做了一些伽玛暴中心引擎的黑洞超吸积模型,其实还有很多其他的模型,如奇异星模型等,我们主要考虑研究了超吸积模型,考虑了吸积流的含时演化。我们得到的主要结论是,在比较高的吸积率情况下 ($\dot{M} > 10M_{\odot} \text{ s}^{-1}$),盘的内区将对中微子不透明,这将导致吸积盘的内区发生黏滞和热不稳定性。我们可以看看所谓的吸积率和黑洞袭击盘的面密度的关系。数值计算表明在比较高的吸积率的情况下,吸积盘是不稳定的。我们也估计了不同半径处吸积率随时间的变化情况。发现吸积率会发生振荡,这将可能在这些振荡的区域形成一个物质环,这可以用来解释伽玛暴的 X 射线 flares。最近在广义相对论的框架下推广了我们的工作,我们主要考虑了黑洞自旋对吸积流的影响,并考虑了能量通过磁耦合从转动黑洞到吸积流的转移,指出吸积流的热不稳定性即使在低吸积率的时候也会出现,比如 $\dot{M} \sim 0.5M_{\odot} \text{ s}^{-1}$ 。这对解释伽玛暴的能源问题是非常有帮助的。虽然说总的能源够了,但是这个能源怎样变成火球的能量,我们说引力能转化为热能,热能产生中微子,然后中微子还在湮灭,这里有很多中间环节。我们的模型可能对解释能源问题有帮助。

梁恩维:

考虑黑洞自旋之后对吸积率会有影响,影响主要是什么造成的?

袁业飞:

影响主要是考虑到不稳定的区域的大小,比如在吸积率 $\dot{M} \sim 0.5M_{\odot} \text{ s}^{-1}$ 时,在不考虑黑洞自旋时不出现不稳定区域,现在随着黑洞的自旋的增加,发现不稳定区域在扩大,主要是从这个方面施加影响。



梁恩维:

不稳定性区域扩大否是通过磁耦合引起的?

袁业飞:

不是磁耦合引起的,主要是黑洞的自旋引起的。

林 隼:

黑洞里面有没有磁场连到吸积盘? 吸积盘里面如果有磁场,吸积盘较差自转,会把磁场绞起来。

袁业飞:

一般认为在能层里面有磁场连到吸积盘,磁场这方面的工作汪定雄老师他们在做。

梁恩维:

在中心机制产生伽玛暴之前,比如说超吸积会不会抛出一个吸积流,会产生一个 jet,来产生暴之前的 X-ray,这是我们想做的工作,想请教你怎样产生这样的 jet?

袁业飞:

这个就比较复杂了,动力学上来是很难计算出来的。如果人为地假设 jet 存在当然可以,包括活动星系核里面 jet 是怎么产生的也不清楚。

徐仁新:

你考虑的是致密的高温的超吸积流,中微子是不透明的。在这样一个超吸积情况下,温度也挺高的,可达到 MeV 量级,这么高的温度情况下辐射压是非常强的,有没有考虑到其影响? 吸积盘的自引力有没有考虑? 如不考虑自引力,那盘还能维持吗?



袁业飞:

中微子在内区不透明,在外区是透明的。辐射压的影响已经考虑了的,甚至中微子的辐射压都考虑了。我们没有考虑盘的自引力。盘的存在主要是中心黑洞来维持的,黑洞质量大概3~10个太阳质量。

张双南:

从你的吸积率来看,在相应的时标上盘吸积的质量与中心黑洞质量相当,盘的自引力不考虑可能会有问题。

徐仁新:

盘的温度很高,应该算盘的温度梯度,要考虑盘的结构,所以不考虑盘的自引力可能不合适。

袁业飞:

原则上应该考虑盘的自引力,考虑到计算问题,我们不得不做了忽略吸积盘自引力的影响这样的简化假设。有些二维甚至三维数值模拟做过这样的考虑。现在对中心引擎知道得太少,在这方面确实需要新观点。



对 Birkhoff 定理的理解、引力透镜的计算问题、物质向黑洞的塌缩问题、“冻结星”问题、史瓦西度规的奇异性问题

◎张双南

报告的主要内容涉及几件事情:对 Birkhoff 定理的理解、引力透镜的计算、“冻结星”、史瓦西度规里面的奇异性等问题,还有物质向黑洞塌缩的问题,其实其他问题都是从这个问题的引申出来的。主要是讨论并澄清以下几个问题:①对 Birkhoff 定理的应用范围的普遍误解,以及在这个基础之上导致的对引力透镜计算的普遍错误;②尘埃物质向黑洞塌缩的精确解的一个计算;③几个黑洞的概念,所谓数学黑洞、物理黑洞和天文黑洞几个不同的概念;④物质向黑洞塌缩是形成“冻结星”还是形成天文黑洞?⑤最后讲一下奇异点的问题。

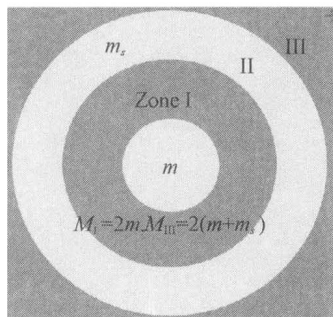


图1 质量分布系统

首先给大家提出一个问题,假设有这样一个质量分布系统(图1),是球对称的,中间有一个质量,然后外面有一个球壳,这样就分三个区域, I、II、III。我的问题:对于 I 区(也就是两个球壳之间的真空的区域)和 III 区的度规是什么的?

我问过很多的人,大概都是这么告诉我的,这个度规就是史瓦西度规,写成这样的形式 $ds^2 = g_u dt^2 + g_r dr^2 - r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2)$, $g_u = \left(1 - \frac{r_0}{r}\right)$, $g_r = -\left(1 - \frac{r_0}{r}\right)^{-1}$, $r_0 = 2M$ 。只不过在 I

区里面用的引力半径是由中心的质量 $M_1 = m$ 决定的,三区的引力半径是由这个系统的总质量决定的。为什么这么回答? 大致的回答有两种。一种回答就



是说,根据 Birkhoff 定理,真空当中球对称的质量分布的度规是史瓦西度规,一般来讲都是这么回答,这么回答听起来比较专业。

另一类回答就是根据数学上的高斯定理,我们计算一个球对称系统的某一个半径处的引力或者电场的时候,只需要计算该半径以内的质量或者电荷就行了,半径以外的不用管它,所以也有人说可以用高斯定理来理解 Birkhoff 定理。但是这是错误的。真正的 Birkhoff 定理是球对称质量分布的外部度规是史瓦西度规,从来没说如果在它外部还有东西的度规是什么样的。Birkhoff 的证明非常清楚,需要使用到无穷远处的渐近平坦。所以这是真正的 Birkhoff 定理,只不过大家都把它给推广了。为什么推广了?很多人都说是根据高斯定理。

但是能够得到高斯定理是因为 R^2 的关系(对电场也是 R^2 的关系),不过在广义相对论的一般情况下是不能这样的。所以说刚才的回答是不对的,就是 I 区的度规不能写史瓦西度规的形式,严格的证明在我们的论文里边,这篇文章最近刚刚被 *Physics Letter B* 接收发表了。

我们的出发点是 Oppenheimer & Snyder 1939 年发表在《物理评论》上的这篇非常有名的文章“*On Continued Gravitational Contraction*”,这是一个里程碑式的文章。这篇文章一开始就说,当一个星体的内部核燃料烧尽以后必然要塌缩。然后它的结论分为两条,一条结论就是说,对于共动观测者来讲,也就是你随着这个塌缩物质往里走的话,在有限的时间之内你就会到达这个中心的奇点,所谓天体塌缩形成黑洞的观点就是从这里来的,在这之前还不清楚这个问题。它的第二个结论,也是论文摘要的最后一句话也是非常有趣的,也引起了一系列的问题。这句话是说,对于远处的外部观测者来讲,他看到的塌缩的恒星只是无限逼近它的视界,换句话说就是无穷远的观测者是永远看不到恒星真正塌缩到视界以内,更不会到达这个中心的奇点,塌缩的物质被“冻结”在视界的外面,因此这个天体不是所谓的黑洞,而是一个“冻结星”。这两个结论都已经被广为接受。我后面会讲到,我们这篇文章引用了几本有名的教科书还有其它的专著来说明这两个结论是被普遍接受的。这两个结论在 Oppenheimer 和 Snyder 的文章里面都是完全正确的,它的数学推导是非常的严格的,也非常的漂亮,但是为什么我们还要写这篇文章来说明在这个领域在中还存在着很多的误解呢?因为关于这个“冻结星”问题就被很多的科普的著作所引用,比如说最新



的一本 Hawking 的书“*George's secret key to the universe*”里边,说当一个宇航员下落时,宇航员自己进去了,但是对于远处的观测者,宇航员是永远也进不去的。这个观点对不对? 我们的研究结果表明,尽管这个观点是从 Oppenheimer 和 Snyder 的这篇文章的“冻结星”概念引申出来的,但是这个观点是错误的。

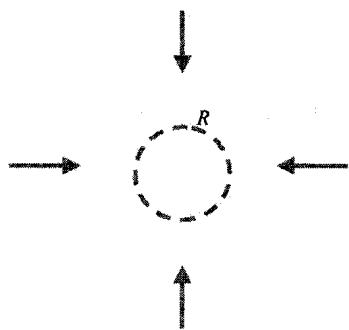


图2 天体结构示意图

Oppenheimer 和 Snyder 的解是在共同参照系里面球对称塌缩的天体的内部度规(图2)。我们首先把它转换到外部观测者或者静止坐标参照系下的度规。转换之后,这个度规看起来非常像史瓦西度规,但是有一点不同, R 处的度规不仅和 R 以内的质量有关,而且和整个系统的质量分布是有关系的,因此并不是史瓦西度规。但是,在很多广义相对论的应用中,比如计算引力透镜时,假设这是一个分布质量的系统,在计算引力透镜时,所有的计算引力透镜的书上都说,这个系统内部任

何一处的度规就是史瓦西度规。因此在计算引力透镜普遍的情况下,如果根据它的计算公式,再根据数据来推测这个系统的总质量,会低估这个系统的总质量,也会低估光子的延迟时间。我们都知道 Shapiro delay,但是 Shapiro delay 是假设史瓦西度规的。如果不是史瓦西度规,Shapiro delay 就要修改,所以我们把这叫做推广的 Shapiro delay。

现在再回到前面所说的 I 区的度规。前面已经说明了 II 区的度规肯定不是史瓦西度规。由于度规必须是连续的,所以在 I 区和 II 区的边界处的度规也肯定不是史瓦西度规,那么整个 I 区的度规就都不是史瓦西度规。这是度规的连续性所要求的,实际上恰好就是 Birkhoff 定理的直接结果。因为 Birkhoff 定理要求 III 区的度规是系统的整体质量决定的史瓦西度规,因此度规的连续性条件就自然要求整个系统任何地方的度规都和系统的整体质量分布有关。

详细的计算表明,当球壳离这个黑洞非常远的时候, I 区的度规是非常接近史瓦西度规的。但是当这个球壳离这个黑洞比较近的时候了,就偏离史瓦西度规比较多了。所以这就跟伽玛暴模型有一定关系,如果这个伽玛暴有回落质量,回落的质量相当的大,最终它要跑到黑洞那里去,那么这里面的度规就不是



史瓦西度规。所以当使用史瓦西度规的时候,就是做了一个近似。最后总结一下,Ⅲ区能够用 Birkhoff 定理,Ⅰ区和Ⅱ区都不能用 Birkhoff 定理。

现在看一下这个球壳的塌缩过程。在共动观测系里边,这个球壳的外边界和内边界在有限的时间内都到达了 $R=0$ 的地方。对外部观测者来讲,内边界在有限的时间内穿越了黑洞的视界,但是外边界不能穿越黑洞的视界,外边界是悬在那个地方的。而且这个内边界即便进入了黑洞它也停在那个地方,永远不再往里走了,这是很有意思的一件事情。这样我们得到两个结论:①这个球壳基本上可以穿越视界,但是球壳永远不能到达奇点处;②外表面不能进入黑洞的视界。

刚才讲的仅仅是一个球壳的塌缩问题,但是这个问题不代表真实宇宙中物质向黑洞的塌缩问题。实际的问题应该是两个球壳的塌缩问题,因为在被我们观测的那个球壳和我们之间肯定还有物质在向里面塌缩,我们把这些物质叫做外球壳。所以,实际上我们需要研究的是双球壳塌缩问题。计算的结果是,在共动坐标系中,在有限的时间内所有的东西都进了黑洞视界,而且到了奇点处。但是,对于外部观测者来讲,我们观测的那个球壳在有限的时间内全部进入了黑洞视界;换句话说,我们确实看到这个球壳是掉进去了。所以我说 Hawking 是不对的,他认为宇航员是掉不进去的,实际上宇航员是掉得进去的,因为在宇航员和我们之间还有物质。实际上,即使从我们这里来看,在很短的时间内宇航员是就会被黑洞所吞掉了。但是不管哪个球壳都进入不了 $R=0$ 的位置,所以我们得到另外一个结论: $R=0$ 的位置物理上没有任何意义,因为东西到不了那一点位置处,那一点的密度就不会是无穷大,因此不是奇异点,没有奇异性。回到宇航员到黑洞旅行的问题,对于我们来讲,尽管宇航员进入了黑洞,但是却永远不会到达中心。然后我们还详细考察了有外球壳跟没有外球壳的情况之下,对里面这个球壳的运动有没有影响? 计算表明是有影响的,确实外面的球壳是影响里面的球壳运动的,这在我们以前对 Birkhoff 定理的理解或牛顿力学的理解是定性的不一样,尽管定量的来讲区别可能不大。

下面讲一下我对几种黑洞的定义。一个就是所谓的数学黑洞,数学黑洞就是所谓的点质量(它可以带电荷),在空间中没有分布,因此我们可以把它叫做奇点。我们以前认为黑洞都是这样的,但是事现在看来实际的黑洞并不是这



样的。

物理黑洞的定义为,如果物质都在黑洞的视界以内,我们就说它是一个物理黑洞,因为我们无法知道视界里面情况。对于物理学家来讲,这个定义就满足所有的在观测上所要求的黑洞的性质,但是也不一定在奇点。以前大家都认为既然进到黑洞视界内部了,很快就进到奇点处了,现在看来并不是这样。

天体物理(或者天文)黑洞的定义就是具有明确天体物理(天文学)形成机制的物理黑洞,所以我们讨论天文黑洞时必须要有个办法形成它。这就是为什么 Oppenheimer 和 Snyder 1939 年那篇文章写完之后,大家比较相信宇宙中存在黑洞了,因为那篇文章提供了一种机制来形成黑洞。实际上,在 Schwarzschild 得到爱因斯坦场方程的黑洞的解之后,包括爱因斯坦在内的很多其他人都不相信这个东西会在宇宙当中存在,因为不知道形成的机制。所以天文黑洞是有明确形成机制的物理黑洞,今天我们知道至少有一种形成机制,就是恒星的引力塌缩是可以形成黑洞的。但是我们的研究明确地表明,天文黑洞不是数学黑洞。因为尽管物质确实可以进到视界里去,但是不会到奇点处,所以质量在黑洞视界内部可以有分布,但是在奇点处没有任何质量。因此如果是通过天体塌缩形成黑洞,那么奇点处就没有任意意义,因为物质永远到不了那点处。所以我们彻底避免了黑洞的奇点问题,就是说我们根本就不需要研究这个问题。当然,作为数学家和理论物理家可以研究这个问题,但是作为天体物理学家没有任何理由去研究它,因为它在宇宙当中不会发生。由于这个原因,进入了黑洞之后也不会到达奇点处,所以在超大质量内部生活并不可怕。但是在小质量黑洞内部比较可怕,主要是密度比较高,因为你全都压缩成核物质了,想活也活不了,超大质量黑洞内部不是这样。

我现在就总结一下刚才讲的几件事:球壳内部以及球壳以内的真空区度规不是常见的史瓦西度规形式。不管是逻辑的推理还是精确的计算表明它都不是,这个结论定性的影响以后的计算,定量的是多少我们还没有计算,这是后面要做的工作。然后随着球壳的下落,球壳内的时钟会变得越来越慢,这一变化是可以产生物理效果的,比如光线穿越暗物质、穿越星系团的时间,这个我们把它称为广义的 Shapiro time Delay。



对于单球壳的下落问题,外部观测者看到球壳外边界趋向了视界,内边界在有限时间穿过了视界,因此物质不会在黑洞的外部堆积起来,所以这个黑洞可能形成和增长,否则按照原来的理解物质都在黑洞的视界外边,黑洞就不能增长了。物质堆积在视界外面是有一系列观测效应的,有人写了一系列的文章来讨论物质堆积在那里怎么办,有很多的效应我在这里就不详细讲了。对于双球壳的下落问题,我们要研究的内球壳在外部观测者的有限时间内穿过了视界,这对应于物理宇宙当中黑洞的塌缩问题。因此我们说真实宇宙中是不存在所谓的“冻结星”,物质不会冻结在视界外面。但是在外部观测者的有限时间内,物质也不可能到达黑洞的数学奇点这个位置处,因此我们得到结论物理宇宙中没有所谓的黑洞的奇点问题。

在我们的文章当中总共引用了 10 个著名的专著、教科书和科普书,所谓引用就是批评。这些专著包括大家都知道的 Misner、Thorne、Wheeler 的《引力论》,Hawking、Ellis 这两个人所写的“*The large scale structure of space-time*”,Weinberg 的很有名的《引力和宇宙学》,Shapiro 写的很有名《黑洞、白矮星和中子星》,还有 Novikov 和 Frolov 的“*Black Hole Physics*”。对于教科书,我们列了两本入门的教科书。对于科普书,我们批评了三本,因为我们投稿的时候 Hawking 的那本书还没有出来。

在论文当中我们也致谢了很多。因为在这期间我跟好多人讨论了这个问题,包括我原来的一个学生唐素敏,美国的 Richard Lieu 教授、英国 Kinwah Wu 教授,还有几个学者是我在袁业飞和赖东主持的黄山致密天体物理会议期间讨论过的,其中的一个人是赖东推荐给我的。也跟国内的几个学者,包括赵铮教授、须重明教授,还有朱宗宏教授讨论过这个问题。

彭秋和:

能否在奇点那里讲详细一点。

张双南:

图 3 给出了两个壳层的动力学解结果,纵坐标是它的半径,横坐标是时间,在图 3(b) 中时间是我们外部观测者的时间,就是我看我这块手表,这就



是我的时间。它最后逼近在一条接近于 0 的直线上,不往里走了,所以到不了奇点。奇点处 $R=0$,永远到不了这个地方,没有这个解。

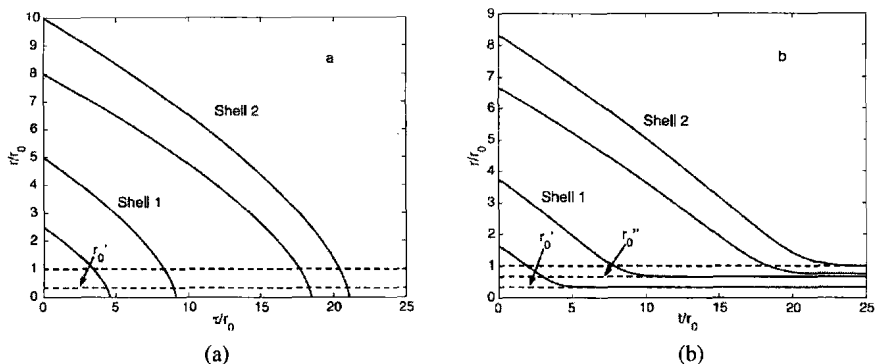


图3 两球壳的动力学解图示

彭秋和:

你这个观点我很同意,20 世纪 80 年代末,我也做了个模型的史瓦西度规,但是好像跟通常理解的 Birkhoff 定理不完全一样,所以我就不敢往外投稿。另外,按照经典广义相对论,奇点根本看不到,不可能有解。

张双南:

引入量子力学有可能解决或者缓解经典广义相对论的奇异性问题。但是,即使在经典广义相对论的框架之下也不会有奇异性问题。

吴学兵:

还是会进入视界对吧!但是它不会到奇点去。

张双南:

物质在黑洞里面几乎是均匀分布的。



袁为民:

物质在什么地方是由哪些量决定的?

张双南:

整个系统的总质量分布决定的。

彭秋和:

不过,我觉得你这个工作很有意思的就是你说的这个引力透镜,而且 Shapiro delay 的影响也还是的蛮大的。

张双南:

我们需要定量的计算这个效应的影响。

徐仁新:

我的问题是,你这么东西,相当于一个星,只不过在黑洞里面,(张双南:对,它的所有质量都是在黑洞里面!)但是怎么有压强去抵抗呢?因为我们知道自引力系统总是有一个与之相抵抗的压强,比如我们在地球上不会飞掉,总是有一个地心引力所吸引,所以你有什么压力来与之相抵抗的?

袁业飞:

压力是个时标问题,其实我们在限的时间内看不到的。

徐仁新:

那我们现在发现天上很多黑洞,那它是怎么给平衡的了?它就不塌下去了?

袁业飞:

不塌下去,没说平衡。

袁业飞:

我有一个 comments, 内部度规不是史瓦西度规对引力透镜的影响, 其实这是有人做的。因为我们普通的物质肯定是不行的, 普通的物理比方说是一个恒星, 你不能说光穿过恒星它还走测地线, 因为碰撞很厉害。很多人算过玻色星, 因为玻色星和我们普通的物质没有相互作用, 玻色星的内部光线怎么走, 它的引力透镜效应有详细的研究的。

张双南:

即使是在星系团的情况下也有人讨论这个问题, 考虑广义相对论之下把它里面度规给解出来, 然后再算引力透镜, 但这是少数派, 绝大部分直接就用了史瓦西度规。

袁业飞:

还有一个问题。就是假如杨立伟, 或者派我们哪个自愿者到黑洞周围, 如果他掉下去, 实际上我们也看到他掉下去了。

张双南:

对, 我们也看到他掉下去了, 但是我们心里应该知道他不会掉到奇点处, 但是他也回不来了。

袁业飞:

是回不来了, 而且它发信号也回不来了, 这个信号到我们这里要无限长的时间。

徐仁新:

没法检验信号是不是到达地球。



张双南：

是没办法检验。但是有一个问题就是我们是不是需要为他举行葬礼？按照以往的理解我们就要为他举行葬礼了，因为到奇点处他肯定牺牲了。但是按照我们的计算，我们不需要为他举行葬礼，因为在我们的有限的时间内，他不会落到奇点处。

卢方军：

咱们这个宇宙将来是不是可能塌缩成这么一个东西？

张双南：

是可能的。

袁为民：

因为假如我们这个宇宙外面没有任何物质的话，会怎么样？

张双南：

如果外面没有物质，它的边就永远挂在那里，它永远有个边在那里，它的边就是个视界，整个宇宙的边界就是它的边，其实宇宙就是这个东西，它是不会进去的，我们也不会掉到整个宇宙的奇点处。事实上，宇宙是一直在膨胀的，而不是在塌缩，说明不断有物质越过视界进入宇宙，视界就不断增加，视界内物质的密度就不断减少，这就是我们现在的宇宙中发生的事情。

王建成：

我觉得你掉进去的下边界与外边的这个质量是不是有关系的？

张双南：

是有关系的。

王建民：

若它是圆的，就到视界去了。

张双南：

这个是单球壳的问题，它挂在这儿了。

王建成：

它挂着到底是哪个位置？跟外边的质量有什么关系吗？

张双南：

就一个球壳，没有外部质量，这就是单球壳的问题。

王建成：

单球壳的问题？

张双南：

对于单球壳的问题，这是外边界，这是内边界，外边界都挂在那儿了，整个宇宙可以考虑是这么一个玩意儿，所以整个宇宙不会有奇点。

林 隽：

从这个角度讲，从大爆炸开始就是那样的。

张双南：

大爆炸是另外一个问题，在这里我没有讲到这个话题。现在有一个宇宙学模型是做太阳物理研究的人提出来的，就是我们宇宙是黑洞增长造成的，原来是一个小黑洞，它不断吃东西，不断吃东西它就膨胀了，东西也不断地掉到里边去，然后算出来的度规真的跟现在的宇宙差不多。



袁为民：

你假设这个黑洞已经有了，再吃东西，有了也是以前吃东西长的，按你的观点，里面也不存在奇点，它也是有个分布的，有新的东西进去以后，它是不是？

张双南：

是的。

袁为民：

进去之后的质量分布跟它以前的分布也有关系。

张双南：

有关系，它是随时间演化的一个分布。

袁为民：

那就是说同样质量的黑洞，它里面的分布是一样的？

张双南：

不一定，跟它的演化历史有关系，

袁为民：

以前的物质跟现在的物质会不会有什么反应。

张双南：

好像后面下落的物质不一定能够追上前面下落的物质，所以可能没有什么反应。

光变曲线 RMS 与光子流量

◎宋黎明

我报告的主要内容是参量 RMS 以及它和光子流量的关系。在座有很多的双星、中子星和黑洞的专家,我们都知道 X 射线双星、超大质量黑洞等天体辐射中包含了大量的物理信息,辐射的时变现象和辐射机制、辐射过程、辐射区几何等因素直接相关,通过对时变现象的分析,可以了解辐射动力学过程的大量信息。时变分析和能谱分析、空间强度分析等对理解天体辐射都是非常重要的。

时变现象分析存在多种形式和手段,其中有大家都知道的傅里叶变换、功率谱等。Fourier 分析应用最为广泛,通过傅里叶变换,可以非常简单的得出时变现象的一些性质。实际上,还有一个量,就是 RMS,虽然很简单,但是也能得到很多意想不到的信息,下面介绍描述时变的统计量 RMS 的情况。

RMS(Root Mean Square)实际就是一组统计数据的平方平均值的平方根。可以表述为绝对的 RMS 和相对的 RMS。绝对的 rms 为 $\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-1} (x(k) - \bar{x})^2}$, 相对的 rms 为 $\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-1} (x(k) - \bar{x})^2 / \bar{x}}$ 。在实际观测光变曲线中含有泊松涨落,在计算 RMS 时必须扣除泊松涨落的影响。由于 Poisson 涨落的方差为其平均值,则 RMS 的表达式可以写为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-1} (x(k) - \bar{x})^2 - \bar{x}}。$$

如果要用傅里叶变换这种方式来计算,根据 Parseval 定理, $\sum_{k=0}^{N-1} |x_k|^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=-N/2}^{N/2-1} |a_j|^2$ 可得,

$$\text{Var}(x_k) = \frac{1}{N} \sum_k (x_k - \bar{x})^2 = \frac{1}{N} \sum_k x_k^2 - \frac{1}{N^2} \left(\sum_k x_k \right)^2 = \frac{1}{N^2} \sum_j |a_j|^2 - \frac{1}{N^2} a_0^2$$

这里 a_j 为光变曲线的 Fourier 变换。利用功率谱的表达式: $P_j = \frac{2}{N_{ph}} |a_j|^2 j$
 $= 0, \dots, \frac{N}{2}; N_{ph} = \sum_k x_k = a_0$, 有表达式: $\text{Var}(x_k) = \frac{N_{ph}}{N^2} \left(\sum_{j=1}^{N/2-1} P_j + \frac{1}{2} P_{N/2} \right)$ 。

利用上面的公式可得到 RMS 的两种表示式:

$$\text{时域表达式: } \sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (x(k) - \bar{x})^2 - \bar{x}}$$

$$\text{频域表达式: } \sigma^2 = \frac{N_{ph}}{N^2} \left[\sum_{j=1}^{N/2-1} (P_j - 2) + \frac{1}{2} (P_{N/2} - 2) \right]$$

这里 P 对应于某个频率的功率。

RMS 有什么用呢? 我们首先介绍发现的一些观测现象。第一, 在 2001 年的时候 Uttley 等发表了一系列的文章, 发现 RMS 与光子流量有很好的线性关系。对于不同尺度、不同类型的天体, 如大家非常熟悉的 Cygnus X-1、吸积的脉冲双星 SAX J1808.4-3658 以及活动星系核等天体, 不论是从质量和类型上区别都很大的这些天体都存在着这样一个 RMS 和流量的一个很好的线性相关。第二, 不同能段的 X 射线辐射, 也都存在着线性的 RMS 和流量相关(如 MCG-6-30-15), 但是高能段的斜率要小一点(如 Cyg X-1)。第三, 就是在不同的时标上, 光变曲线也存在 RMS 和流量的线性关系。如 Cyg X-1, 取时标 20 秒的数据和取时标 1 秒的数据, 仍然有这样的关系。第四, 在张双南的工作中, 太阳耀斑和伽玛爆当中也存在这样的关系。这就说明, RMS 与流量相关实际上是自然界中一大类天体辐射中都存在的一个关系。

发现了这样一个现象, 对这个现象的研究有什么意义? RMS 描述的是辐射过程的动力学性质, RMS 虽然是一个很简单的量, 对它进行研究, 也将加深对辐射过程的理解。

意义一: 在我们原来作时变分析的时候, 比如说做傅里叶变换测它的功率谱, 我们关心的是看一看有没有周期信号, 主要关心的是形状, 对功率谱的幅度、怎么变化并没有太多关心。实际上, 由于 RMS 和功率谱的积分有关, 因此, 从 RMS 研究角度来说, 不仅功率谱的形状有重要意义, 而且功率谱的幅度也具有非常重要的意义。研究发现 (Uttley, 2001): 通过功率谱分析发现, 不同流量处的功率谱形状基本没变, 但是幅度变了。RMS 随流量的变化而变化, 但功率

谱的形状保持不变,由此可以看出,利用功率谱来描述时变过程对幅度关注不够,即仅有形状描述是不够的,幅度大小也是有意义的,这就利用了更多的信息。

意义二:通过 RMS 和流量的线性关系,虽然非常简单,但是可以非常有效地甄别辐射机制。大家都知道,我们在 X 射线双星和 AGN 中,有一个光变曲线的模型是稳态的 shot-noise 过程,最简单的 shot 模型认为光变曲线是由相互独立、随机分布的脉冲叠加而成的,和 shot 有关的参数是稳态的。我们通过 RMS 和流量呈线性关系这样一个事实,来考察模型的正确性。首先考虑如何满足在 RMS 不同的地方流量会不同这个条件呢? 似乎一种可能的方案是,通过一个参数 (shot 幅度) 的调节就可以解释 RMS—流量的线性关系这种现象。这个解释实际上是不对的,这是由于这个解释不能给出 RMS—流量线性关系在很大范围的时标 (频率范围) 上都成立的观测结果。也就是说,由于在不同的时标上 RMS—流量线性关系都存在,按照上述假设,Shots 的参数将在所有时标上都是不同的,也就是说不但小时标上不同,大时标上也要不同。这样就导致一个问题,功率谱的形状是稳定的,要求和 shot 有关的参数是稳态的,而上述的讨论要求 shot 有关的参数必须是变化的,所以完全随机的 shot-noise 这样一个过程是不可行的。这就需要大时间尺度调制加 Shots noise 的模型。不同时标上的变化是耦合在一起的。

意义三:RMS—流量线性关系可以有效地甄别辐射过程。描述非周期 X-ray 变化的主要模型有:①简单的 shot 或 flare 模型,不符合 RMS—流量线性关系,如果是类似于临界状态的线性马尔科夫过程激发的 shot 或 flare,却可以产生符合观测结果的过程。这样的模型一般认为耀斑是由发生在冕内的磁重联产生的,叫做“coronal flare”模型。②“Propagating Perturbation”模型认为 X-ray 变化是由出现在不同半径处的吸积率变化引起的扰动向内传播,调制 X-ray 发射区的能量释放而产生的。这两种模型,特别是对于吸积中子星来说,如何来判断哪个模型是正确的? RMS 分析可以充当这个工具,现在我们讨论如何识别这两个模型。通过简单的能谱分析,或者简单的光变分析,或者是不同能谱的变化的分析,发现中子星 XRB 的 X-ray 辐射大多来源于中子星表面或接近于表面的边缘。2003 年的时候,Menna et al. (2003) 通过对 SAX J1808.4-3658 观



测数据的功率谱分析得出结论,其光变曲线的变化是受其周期调制的。周期调制就是说,对于时域来说,光变曲线是随周期产生变化的。2004年的时候,Uttley(2004)得出 J1808.4-3658 与 401HZ 脉冲相关的 RMS 与流量存在线性关系,也说明光变曲线和周期是耦合在一起的。同时,他们存在一个线性关系,流量和 RMS 在 401 Hz 的地方,有这样一个线性的关系。

这样就存在三种可能性:在整个的能量释放过程当中,存在着 RMS 和流量线性相关的物理过程。自转周期对这个物理过程有调制作用;存在满足 RMS—流量线性关系的物理过程,周期调制发生在这个过程之后;也就是说,在能量释放出来以后,剩余的物质,通过吸积柱到达中子星,这样的话,周期调制实际上是表现在对表面辐射的调制。前两种可能性都存在。Uttley(2004)对这些可能性进行了模拟研究,模拟结果表明,只有第一种情况和观测一致,即存在满足 RMS—流量线性关系的物理过程,周期调制这个过程。由于在自转周期处存在 RMS—流量线性关系,这说明辐射过程一直持续到中子星表面。考虑中子星的吸积性质,这个过程如果一直持续到中子星的极冠区,也就是说这么一个辐射过程是随吸积流(在极冠区)运动的。这就说明这种 X-ray 变化是来自于中子星表面,来自于吸积流而不是来自于冕,从而不支持“coronal flare”模型。

下面作一个简单的总结:

(1) RMS 是一个非常简单的统计量,说明功率谱的幅度和形状一样是非常重要的,结合 Fourier 分析,提供了一种对实验现象的新的分析手段。

(2) RMS—流量线性关系存在于大量的天体物理过程中,是具有相当普遍性的关系。

(3) RMS—流量关系是研究 X 射线辐射过程的有力工具,可以得出存在对辐射过程大时间尺度调制的结论,检验排除了一系列 X 射线辐射模型。

我们也正在做一些工作,比如说对不同的源的辐射现象,考察 RMS—流量的关系,因为还不是很成熟,我不再做过多的介绍,但是有一点需要注意的是,在黑洞或者中子星,它的态变化的时候,整体的调制是受影响的。这是我们现阶段得出的一个初步的结论。



徐仁新:

流量并不是一个内禀的物理量,为什么这样两个非内禀的量之间存在线性关系,我觉得这可能是一个观测效应,但从你的分析看来,跟辐射机制是有关系的。

宋黎明:

它是一个直接从观测中得到的效应,这个是在 2001 年之后大家才开始关注的关系,在这个关系里面,主要是说明什么样的性质呢?如果这个线性关系是存在的,物理过程一定不是完全随机的,是受到一个大范围的调制的。换句话说,如果刚才伽玛暴的里面也有这样的 RMS—流量关系,我们就可以肯定地说,和在黑洞辐射类似,它的脉冲辐射不是完全随机的,才能满足这个关系。

徐仁新:

如果说, RMS 与 luminosity 有关系,我还可以理解,可能与辐射机制有关,因为 luminosity 是一个内禀量。但是流量是一个观测量,与距离有关系。

宋黎明:

这是对单个源来说的,有意义的是流量的变化。

梁恩维:

从直观的感觉来说, RMS 和流量的相关性是大尺度物质的,是否可以这样理解,整个里面有一些微观背景,如果把整体的变化去掉,里面会有微光变,这些微光变是否存在这样的关系。

宋黎明:

应该反过来说,如果找到它是线性的,就肯定是大尺度的。如磁场的调



置,也是这么一个问题。太阳耀斑为什么有 RMS—流量线性关系,肯定有东西在调制它。

韩金林:

我想知道你所说的 RMS—流量线性关系在自然界中有没有自然的体现?比如在射电天文里,一个强源如果测量它受到的干扰,若它的流量比较大了,它的 RMS 也会大,这是没有问题的。如果看 X 射线估计也是一样的。

宋黎明:

干扰对流量的影响不满足这个线性关系,而且在某些态里面,这个关系就是相反的。

韩金林:

这里就有个问题,如果在某种接收状态下,就应该是这样的,这是在相反的情况下有可能;如果是正常的情况下,不应该是这样的。

宋黎明:

比如在这个态的转化过程中,RMS—流量变化是相反的,现在还没有弄清楚。

张双南:

你所说的正常的情况是什么物理机制呢?

韩金林:

就是认为一个随机过程。

张双南:

泊松过程就不是这样的。



宋黎明:

如果考虑一个完全线性的过程,没有调制,RMS—流量关系就不是一个线性的问题。这个线性反映的不同时标上的调制。

王建成:

比如流量是一系列过程堆积起来的,如果流量的每个过程都是随机的,RMS和流量绝对不会是线性的。若有某种过程调制它,使得不是一个纯粹的随机过程,就会出现相应的线性关系。因为流量是由很多过程累积起来的。

白金明:

如果X射线观测灵敏度足够高,这个关系还能成立吗?是否可能是因为时间分辨率不够高造成的?

宋黎明:

你说的时间分辨率够好只是对分辨的频率范围有影响,对整个功率的计算是没有影响的。

吴学兵:

我问一下,你现在排除了 coronal flare 模型。

宋黎明:

我不是排除,只是在这个源里面是不成立的。不是把那个模型排除了。

梁恩维:

有一个大尺度的调制机制在里面,难道在这个调制里面就没有一点涨落?



宋黎明：

就看这个调制是否是一个稳态，我们说的稳态不是说它不是一个随机过程，而是指它的参数分布是稳态的。

张双南：

有一个数学模型，所谓的自组织临界效应好像能够解释。但是数学模型在这里面怎样跟物理过程建立关系是一个问题。



黑洞吸积盘中心的热核燃烧与核合成

◎彭秋和

今天我要讲的是黑洞吸积盘中心区域内的热核燃烧与核合成问题。近年来,天文观测中出现了很多问题,都急需这一领域的理论解释。我们先来看一下天文观测提出了哪些问题。

首先,范晓辉在2007年发现, $Z > 6$ 的8个类星体光谱中金属元素的光谱结构与 $Z \sim 0$ 的类星体光谱中金属元素的光谱结构相似。于是,他就提出类星体、活动星系核光谱中显现的金属元素并非来自于恒星内部的核合成,而是合成于活动星系核的吸积盘内处于高温状态下的中心区域,后来通过喷流抛射出来。不过他只是提出了这么一个观点,还没有人具体在做。

第二,近年来在国内外天体物理学大会上经常提到的一个问题,对银晕中极贫金属星的观测结果,将铁和氢的含量比取对数,再与太阳的这一数据对比,其值 < -4 。这些极贫金属星光谱中通过快中子俘获过程而形成的重金属元素,其丰度分布相当弥散。按照过去的观点,重金属元素是在10~25个太阳质量的II型超新星爆发时合成的。如果是这样,那么重金属元素的比例就应该跟铁的比例是差不多的。但比值 < -4 ,这一观测结果说明它们之间差距很大。看来传统观点解释不了这一结果。于是国际上就讨论的沸沸扬扬。有人认为这些重金属元素可能合成于8~10个太阳质量的超新星爆发。我的观点是这些重金属元素也有可能合成于活动星系核的吸积盘内处于高温状态下的中心区域,后来通过喷流抛射出来。

第三个问题,就是20年前我参与构建的一个“玩具”模型。当时的情况是,从银心方向观测到非常强的0.511 MeV的电子对湮没辐射的伽玛射线。为了解释这一现象,国际上提出了十几个模型,其中一个比较好的,是引入了电场加速作用的黑洞吸积盘模型。但它也不能完全解释观测现象,而且过于复杂。我



们当时提出的“玩具”模型,是利用粒子物理磁单极催化核子衰变的理论来解释的。假设活动星系核里面有好多磁单极,就可以基本解释这一现象,但还是不能解释伽玛射线观测流量的变化。于是这个问题就一直悬而未决。后来有人归算出来,在银心方向正电子的流量每秒有 10^{43} 个。这个数据又怎么解释?现在我就想,这些正电子能否产生于星系中心黑洞吸积盘高温内区,并通过喷流带到外区?

第四个问题就是 Advection 吸积盘模型。在这个模型中,吸积盘内区的温度高达 10^{11} ,但是密度不高,数密度为 $10^{10\sim15}$ 。我曾经也了解过吸积盘,想做一些工作,但黏滞系数始终是人造的,不能客观确定,这个问题很难解决。1990 年的一篇文章有人提出来,如果吸积盘内区存在相当数量的自由中子,由于中子不带电,不与磁场相互作用,所以它的平均自由程很长,可以达到致密天体尺度的量级,远大于荷电粒子的自由程。因此中子更容易把角动量转移,把动能耗散转化为光度。那篇文章认为,自由中子主要来源于 He 的裂解。我想,这些自由中子可以更自然地来源于不同的物理过程。

由前三个观测现象和第四个 Advection 的吸积盘模型,我们就可以讨论今天的主题了。在艾德曼吸积盘内区,1.5 ~ 10 个施瓦希半径之间,温度很高而密度不高,物质形式包括质子、中子和正负电子,它们热运动的能量远大于静止能量。通过两个光子转化为正负电子对的反应,正负电子对在这一区域大量产生。据此我们就可以估计正电子的数密度。在 10 ~ 20 个甚至 30 个施瓦希半径的区域,温度也相当高,在 10^9 以上。该区域的物质组成为氢约占 76%,氦约占 24%。在这么高的温度下,热核反应就会迅速猛烈地进行。不仅有 H 燃烧的质子链反应,还会有 He 燃烧的 3α 反应。 3α 反应就会产生碳和氧,一旦碳和氧产生,就立即开始了碳氮氧循环。这就可以解释类星体光谱中金属元素的问题。正如范晓辉提出的,类星体、活动星系核光谱中显现的金属元素,可以合成于活动星系核吸积盘的内部区域。

我们再回到吸积盘的中心区域,1.5 ~ 10 个施瓦希半径之间。在这一区域里,正负电子非常多,质子俘获电子形成中子的过程大量进行。所以,在此区域一定存在相当数量的自由中子,这就对吸积盘的黏滞系数产生了影响。这些自由中子不仅在吸积盘内区转移角动量与能量耗散转化为辐射能过程中起重要



作用,而且通过对流流入稍外区域,参与核合成(中子俘获过程),形成比铁还重的重元素。这样,在上述过程之后,吸积盘内区必定存在相当数量的额外的自由正电子。这些正电子随喷流运动到活动星系核表面区域,同外围的低速电子湮灭成 0.511 MeV 的可观测伽玛射线。我们也可以估计出正电子的数目,来检验一下它在银心方向上的流量是不是每秒 10^{43} 个。

除此之外,吸积盘内区的正负电子对还要产生中微子,其能量在 $10 \sim 100$ 个 MeV 。这个能量不算高,但它也是宇宙中微子的本底。而且这些中微子也可以诱发较外区的核反应。

这样,我们改进了 Advection 吸积盘模型,也解决了前三个观测中提出的问题。我们在建立这个模型的过程中,对于吸积盘内区正负电子对的数量(非简并情况)、质子俘获电子的过程,以及外区中子俘获的过程,都进行了详细的计算。其计算结果与已知的观测数据基本一致,这就是我对于黑洞吸积盘中心区域热核燃烧与核合成问题的看法。目前,这还只是我的一家之言,其正确性有待于今后观测的检验。

袁业飞:

你讲的中子化对黏滞性的影响,文章发表在哪里?

彭秋和:

发表在 1990 年的 *ApJ* 上。

袁业飞:

中子虽然不带电,但它和质子是相互作用的,而且作用截面很大。形象地说,中子就是绑在质子上的。因此,中子化对吸积盘的黏滞性究竟有多大影响,还不好说。

彭秋和:

你说得很有道理。不过我这个模型,重点是产生自由中子的机制。只要有了自由中子,我就能解释上述观测现象。至于中子化对吸积盘的黏滞



性有多大影响,在这里无关紧要。

王建民:

黑洞质量越大,越不利于热核反应。确定在大质量黑洞的吸积盘外区,也会发生 He 燃烧的 3α 反应吗?

彭秋和:

在吸积盘外区,也就是 $10 \sim 20$ 个施瓦希半径的区域,温度高达 10^9K ,而且氦的丰度约为 24%。在这种条件下,我认为不管质量多大的黑洞,都会发生 3α 反应。

伽玛暴中 X 辐射物理起源的多样性

◎梁恩维

我今天要介绍的是伽玛暴中的 X-ray 的辐射。其物理起源可能存在多样性。我关注的是几个问题是,一是伽玛暴前的 X 射线辐射,这个成分以前是大家没有关注的,这是 Yamazaki 最近提出,并且我们的数据统计分析结果也支持这个观点;其次是伽玛暴火球的余辉辐射问题;第三,我介绍可能是来自中心机制辐射所形成的光变曲线中的平坦部分。随后我介绍晚期 X 射线耀发和短暴中的延展性,比较伽玛暴本身辐射跟 X 射线耀发异同点,看其是否具有相同的物理起源。

我首先介绍 Swift 卫星。这个卫星上有三个仪器,一个是 BAT,第二个是 XRT,还有一个是 UVOT。我介绍的主要是 XRT 的,它的能段是 0.3 ~10 keV。我把 Swift 观测到的光变曲线分为几类。根据 XRT 观测,我们得到了一个所谓的规整光变曲线,这个是最为普遍的。它们的基本特征首先是快速地下降,很陡,下降的幂率斜率大于 3,然后是比较平坦的一段,下降斜率一般是 0.5 左右,紧接着是以下降指数为 1 左右的下降段,最后是由于喷流效应导致的快速下降段。我用虚线标出喷流拐折段,其实在 X 射线光变曲线中大部分没有看到,基本上只有光学波段的观测。

我们最近发现有这么一类 XRT 光变曲线,典型的像 GRB 080319B 和 061007,从暴后几十秒到天以上都没有出现所谓的规整化行为,就是非常简单的幂律衰减。这类 XRT 光变曲线我们称为纯幂率衰减的 XRT 光变曲线。我今天讲的最主要部分就是这类光变曲线及形成其跟规整化 XRT 光变曲线的显著差异性的原因。

第三类 X 射线光变曲线是 XRT 光变曲线中的平台段。这个段往往随后跟有一个快算下降的段,下降的斜率甚至大于 3。这很难用外激波起源来解释,



可能是跟外部介质完全无关的,来自中心机制的。

第四类 XRT 光变曲线就是无规的 X 射线耀发。除了这些规整化部分外, XRT 光变曲线上往往还叠加不规则的 X 射线耀发。其时间可能是暴后的几十秒,甚至也可能是暴后一天后出现。

下面我逐一介绍这些光变行为可能的物理机制。首先介绍规整化和单幂率衰减的行为。我们在发现单幂率衰减这类光变曲线后,详细搜索了 Swift 从 2004 年来的观测数据,发现这种光变曲线很少,仅仅得到 19 个比较完整的暴。但是我们注意到这些源开始时光度差异很大,然后一天左右, X 射线光度分布很窄。有趣的是,规整化光变曲线中的平坦段和随后的正常下降段,也有类似的行为。如果我们认为这个平坦段纯粹是由于时间设置不对,不是在暴触发的时间点,而是在暴前,那么这些规整化光变曲线可以形变为单幂率衰减。经过时间零点前移,我们发现单幂率衰减和规整化两类光变曲线行为很一致。我们也没有看到这两类暴本身和 X 射线辐射谱存在系统的差异性。因此,我们推断这两类光变曲线的表观差异性可能是时间零点造成的。我们用火球模型检查这些辐射是不是由外激波产生的,发现吻合很好。

数学上把时间零点往暴触发前挪,其物理意义就是这个辐射成分更早于暴的辐射,意味着这个辐射成分来自另外一个火球。这就对中心机制的研究带来新的线索,为此我们提出一个模型。其主要思想是在开始的时候,假设塌缩,形成一个质量为 3 ~ 5 个太阳质量的黑洞,然后通过超吸积的过程,形成两个火球,一个是盘内区中微子湮灭驱动的宽喷流,一个是通过 BZ 机制形成的火球。中微子湮灭形成的火球在外部介质中运动,被减速,产生外激波辐射,形成先导 X 射线辐射,而 BZ 机制形成的火球则产生伽玛暴。

如果我们认为规整化和单幂率衰减的 X 射线辐射是先导辐射。那么很自然的一个问题是,伽玛暴火球的余辉哪里去了? 因此我们根据火球模型预言,又系统地搜索了是否找到火球的余辉辐射。我们发现近 20 个暴在早期光学数据里呈现显著的余辉开始上升的部分,这些源的 X 射线光变曲线也有。光学和 X 射线数据差异非常大,应该不是同一起源的。因此,我们认为这些光学辐射是来自伽玛暴火球的余辉辐射。在 X 射线数据里是否也看到余辉辐射成分呢? 我们也做了搜索,发现也有类似的暴,但是不易于鉴别到底是 X 射线耀发还是



余辉启动的过程。

下面我介绍的是第二类 XRT 光变曲线,就是暴本身内部起源的平台段。最典型的是 GRB070110 这个源,其有很长时标的很平坦段,然后再猛地掉下来,下降指数达到 9。Kumar 等人认为暴本身和这些 X 射线辐射都是由于吸积前身星不同层物质所致。和徐仁新老师的一个博士生合作,我们又进行了一系列的研究,假设他的模型是对的,估算了前身星的性质,并跟数值模拟结果比较。

接着我要给大家简介 X 射线耀发的问题。我们全面分析了 X 射线耀发的形态和谱演化,并跟暴本身的脉冲比较。暴本身的脉冲谱演化一般有两种,一种是谱峰值能量演化追随者光变行为,另一种是从开始到后面都是由硬到软演化。我们看到 X 射线耀发几乎全部都是单一的由硬到软的演化。比较 X 射线耀发、暴脉冲和余辉启动过程光变形态,我们看到 X 射线耀发跟暴本身比较一致。因此,总体而言,我们认为 X 射线耀发跟暴本身的脉冲一样,应该是内激波产生的,但是物理条件也可能不一样。

总体而言,暴前的辐射是我发言的核心点。对于这个辐射成分的理论模型还有很多的事情要做。

吴学兵:

你所讲的起始洛伦兹因子估算是不是统一的物理假设?

梁恩维:

我们假设都是一样的,而且伽玛暴效率统一取为 0.2。

王祥云:

如果存在先导的 X 射线辐射,应用经典的火球模型能否解释它光学薄的阶段?

梁恩维:

两个火球可能不搭界。先导辐射火球可能早于伽玛暴火球进入光学薄



而产生了先导的 X 射线辐射。这个火球是可能是塌缩吸积过程里面开始已经有了。这个问题还很不好说。

袁业飞:

最后你说源 060729 的时标拖得很长,如果前面的星际介质扫的比较干净了,后面还会出现?

梁恩维:

这个源确实拖得很长,到年量级上还能观测到 X 射线辐射。从数据分析看中心氢吸收不是很显著。

吴学兵:

是否系统搜索过暴视场中存在先前的 X 射线辐射?

梁恩维:

这需要搜索整个观测区域看有没有多余的点源。我们也做过,一个一个去搜索,工作量很大。目前也没有一个好的办法和好的解释。

伽玛射线暴的高能光子和粒子辐射

◎王祥玉

我今天要讲的是伽玛射线暴高能光子跟高能粒子的关系,这是个争议很大的问题,也很适合作为沙龙讨论的话题。

现在流行的伽玛射线暴模型大致是这样的,大质量恒星的塌缩(长暴)或者致密星的并合(短暴),总是要产生一个黑洞加吸积盘这样一个结构,同时产生相对论的喷流。这个相对论性喷流的内部情况不是很稳定的,由于不同部位物质速度存在着不一致性,导致速度些快的物质追赶上速度慢的,这样就会产生一个 Shock,由于这个喷流内部的碰撞,所以我们通常称之为 Internal Shock。这些物质继续往外走,走到一定距离上碰到外部介质就会减速,这个减速过程类似于超新星的遗迹,会产生一个向外的激波。这样就产生了我们观测到的 Afterglow——从 X 波段到射电波段的 Afterglow。这就是现在流行的模型。在 Internal Shock 这个区域会产生粒子的加速,主要是激波的一阶费米加速。粒子不停地穿过激波面,从而获得越来越多的能量,这样的激波加速的过程可以把粒子的能量加速到很高。现在从观测上可以得到一些粒子的能量的大小,比如说 Afterglow,因为 Afterglow 来自于电子的同步辐射,如果有磁场的信息的话,很容易得到电子的洛伦兹因子。现在一些模型要求电子的 $\gamma_{e,Max} > 10^5$ 这么高。另外,如果伽玛暴喷流里面有质子的话,根据激波的磁场和激波的大小区域可以算出电子能加速到 10^{20} 电子伏特,这样就达到了极高能宇宙线的能量。所以,伽玛暴也是极高能宇宙线来源的一个可能的候选者。如果有质子的话,就涉及质子与伽玛暴里面丰富的光子相互作用,以及质子跟质子本身的碰撞产生的高能中微子的相互作用过程。但由于没有办法直接知道宇宙线是从哪个伽玛暴源来的,中微子到现在为止也没有探测到,所以这个问题现在仍然是有争议的。所以我想跟大家讨论的是这样几个问题,一个就是 GRB 里面是否存



在强子成分? GRB 高能光子会来自强子辐射吗? 另外一个问题是 GRB 是否可能是高能宇宙线源? 这些问题都是存在很多争论的。

一、GRB 存在强子成分吗?

长时标伽玛暴不管它的中心引擎是什么情况,其喷流是必然要穿过大质量恒星的包层,按理说它是一定要夹带一定的量的质子进去的。在这以前人们担心的是伽玛暴如何达到很大的相对论洛伦兹因子,因为重子物质的质量很大。根据最近一篇文章,讨论了伽玛暴 Internal Shock 标准模型里预言的热成分,指出热成分的存在要求磁能占的比例要很高,才能与观测一致。这样就提出一个问题,喷流里面究竟有没有重子成分?

二、伽玛暴的高能光子是不是来自于强子的辐射?

Fermi 卫星 2008 年 6 月份上天,至今已探测到大概 10 个左右的高能光子 (>20 MeV) 伽玛暴。有一个暴,发表在 Science 上的,它的光变曲线,见图 1,将它做光谱分析发现它是下面这样一个简单的结构,见图 2。

这是否表明从 Kev 到 GeV 的辐射是来自同一个成分? 如果这样的话就可以对模型提出一些限制,我们就研究了它在这种限制下的情况。首先同辐射的模型是大家提得最多的,我们也算了一下电子同步辐射能不能达到 70GeV,因为这个暴高能光子可以达到 70GeV。对于激波加速,效率比较高的 Bohm diffusive 激波加速是可以满足这个条件的。同步辐射模型还要解释一个问题,为什么我们没有看到电子的逆康普顿成分? 这个是可以理解的,电子跟里面的光子散射不是在汤姆生散射范围之内,而是进入了 Klein-Nishina 区间,一旦进入 Klein-Nishina 的区间,我们知道这个 SSC 和 IC 的成分就会减弱,所以这样可以理解我们为什么没有看到这个 IC 成分。

另外我们关心的问题是,高能光子对强子辐射模型有没有限制,如果相信它是来自同一个成分的话,这个对强子模型实际上是很不利的情况,为什么呢? 如果假定整个成分都是强子产生的,所以就假定这个 peak 也是强子产生的,算一下强子辐射能量的效率,就发现质子同步辐射模型的效率是很低的。另外还有一种叫做光介子过程,就是质子跟光子先反应产生 π 介子然后衰变,然后产

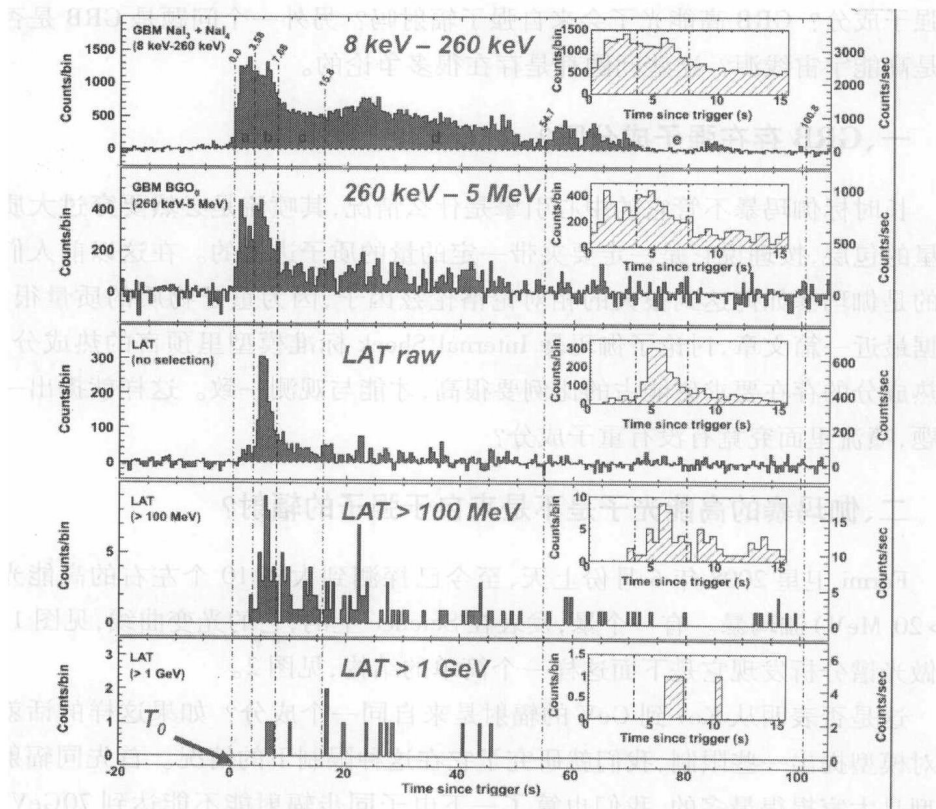


图1 GRB 080916C 不同波段的光变曲线

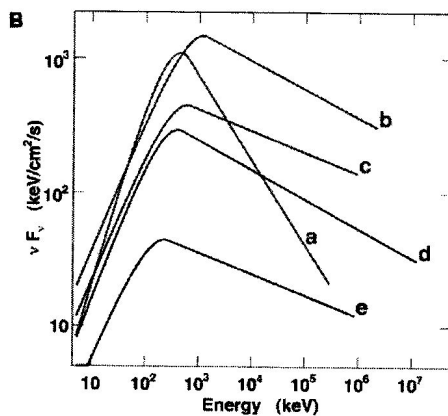


图2 GRB 080916C 的光变曲线分析结果



生次级电子,这样再产生 MeV 的高能辐射。要产生 $p\gamma$ 反应的话必须要有比较强的光子场,这样就有一个问题,一旦有强的光子场就意味着 $\gamma\gamma$ 光深也很强,而我们已经看到了 70GeV 的光子,这表明 $\gamma\gamma$ 光深不是很强,这样就可以把产生 Photopion 过程的效率写成这样的一个函数:

$$\begin{aligned} f_{\pi} &= 2 \times 10^{-3} I_3^2 \left(\frac{\varepsilon_h}{70\text{GeV}} \right)^{-1} \left(\frac{\varepsilon_p}{2\text{MeV}} \right)^{-1} \tau_{\gamma\gamma}(\varepsilon_h) \\ &= 2 \times 10^{-3} (\Gamma/\Gamma_{\text{lim}})^{-6} I_3^2 \left(\frac{\varepsilon_h}{70\text{GeV}} \right)^{-1} \left(\frac{\varepsilon_p}{2\text{MeV}} \right)^{-1} \end{aligned}$$

这个要求 $\gamma\gamma$ 光深 ≤ 1 的话,效率实际上也是比较低的。从这点来看,似乎更加支持轻子的起源。其他的情形如 AGN、超新星遗迹里也有这样的情况。因为强子的效率是比较低的,没有轻子的辐射效率高,所以这个强子的模型就有能量危机的问题,因为这个暴的能量已经很大了,已经达到 10^{54}erg ,如果再假定这个效率比较高的话那能量就会推到非常极端,就非常严重。所以从光子角度而言,不支持光子都是来自于强子辐射。但注意这个并不能排除伽玛暴不是高能宇宙线的能源。

三、伽玛暴究竟是不是高能宇宙线的源

这个问题存在着很大的争论。

图 3 是高能宇宙线的能谱,低能端这段是银河系内的宇宙线,主要由超新星遗迹产生的,然后到膝区这个过渡阶段,然后到能量高于 10^{18}eV 以上,我们称它为 Ultra-high energy cosmic rays,能量值特别高的这一段很有意思,因为它涉及很多基本的物理问题,究竟是什么过程产生的呢? 模型有很多种。伽玛暴是一个候选者,为什么说伽玛暴是一个候选者,一个要看伽玛暴能不能把质子加速到这么高的能量,这是必须要首先回答的问题,也就是伽玛暴能不能把质子加速到 10^{20}eV 。图 4 画出了最大能量依赖于磁场和半径的关系。

回旋加速过程中半径—磁场关系要满足在这条件以上,才能产生 10^{20}eV 。伽玛射线暴的磁场很大,半径也是可以满足这个条件的。其他的 AGN 也可以满足这个条件,还有 Galaxy clusters 满足这个条件,这已经有几种模型了。

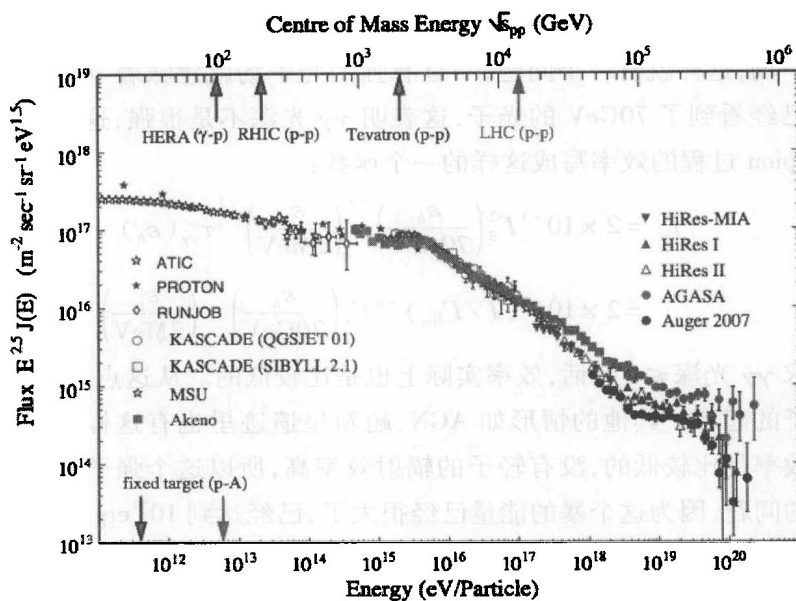


图3 高能宇宙射线的能谱

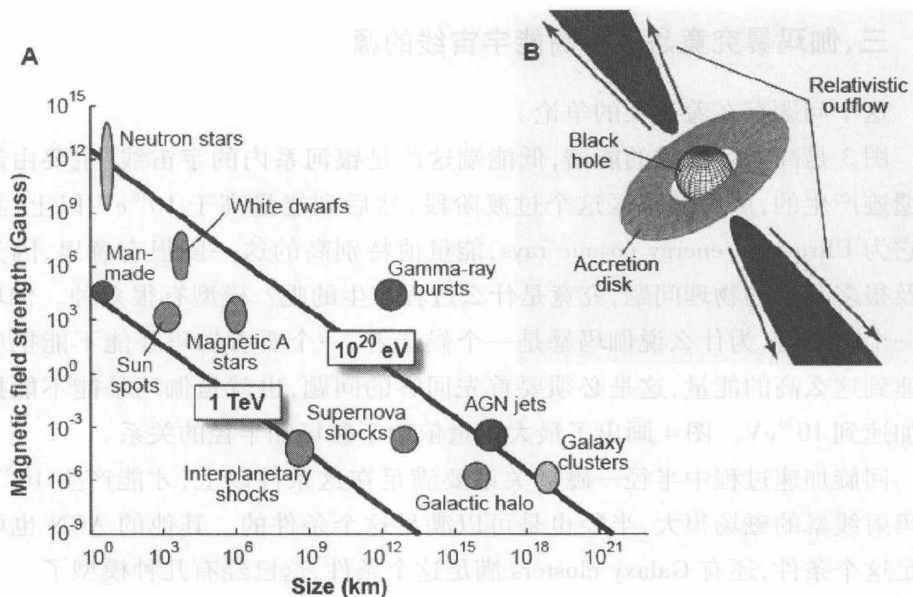


图4 最大能量与磁场和半径的关系



另外一个条件是能不能提供这么多的能量,伽玛暴的爆发率和能量是不是足够大,够不够? 实际上算出的河外的宇宙线要求的能量密度大概是 $10^{43.5} \text{ erg/Mpc}^3 \text{ yr}$ 这样一个量级。对伽玛暴可以估算如下:简单地说一天可以探测到一个伽玛暴,一个暴可以产生这么多能量 (10^{52} erg),然后可以算一下宇宙 3 Gpc 立方体积里面伽玛暴的产能率,得到 $\frac{10^{52} \text{ erg}}{(3 \text{ Gpc})^3 * 1 \text{ day}} \approx 10^{44} \text{ erg/Mpc}^3 \text{ yr}$,是可以满足在 EGCR ($> 10^{19} \text{ eV}$) 之上的。

(袁业飞:我记得在 1993 年、1994 年 Weekes 算过,就是说高能宇宙线在 50 Mpc 外已经是很难到地球上来的,你算的 3 Gpc 的体积,这个高能质子的贡献是不是多算了?)

王祥玉:没有,刚才算的是单位体积内的伽玛暴能量产生率。

张双南:你这一天可以探测到一个,不是算的总的,你这一天可以探测到一个的假设在这起什么作用?

王祥玉:如果我们只算 100 Mpc 范围内,伽玛暴的爆发数目要少很多。但是计算的单位体积能量产生率是不变的。)

除了伽玛暴的内激波模型,还有外激波模型以及我们提出的 Hypernova 模型也可以产生极高能宇宙线。我就简单地说一下 Hypernova 模型。普通的超新星实际上产生的高速物质成分是很小的,由于 $E_k \propto (\Gamma\beta)^{-5}$ 这个关系,所以这个高速成分是很小的,但是与伽玛暴相关联的 hypernova 的 $\Gamma\beta$ 关系的要平滑很多,这样高速的 ejecta 就可以把粒子加速到这么高的能量 (10^{19} eV)。跟伽玛暴相比,hypernova 的好处是总的产能率比伽玛暴要高。普通的伽玛暴大概是这样的爆发率 ($1 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$),但是 hypernova 可以达到 $500 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$,这样即使单个的能量比较低,但 hypernova 的总的能量产生率要比伽玛暴高,所以 hypernova 也是产生高能宇宙线的一个可能的源。

图 5 就是 Auger 发表在 2007 年底一个统计,他们寻找宇宙线和 AGN 相关性的问题,发现 27 个能量比 10^{57} eV 高的宇宙线事件在它们的位置误差半径内找到相对应的 AGN,而且分布具有各向异性,这样就是找到高能宇宙线分布上的非各向同性的情况。Auger 他们在文章里面自己说得很清楚,这个不一定就表示高能宇宙线一定是 AGN 产生的,因为跟 AGN 有类似分布的天体也有可能

是高能宇宙线的源。所以他们讲得很清晰,不一定完全支持是 AGN,伽玛暴这种天体也是有可能的。这里讲是高能宇宙线与伽玛暴的关系。

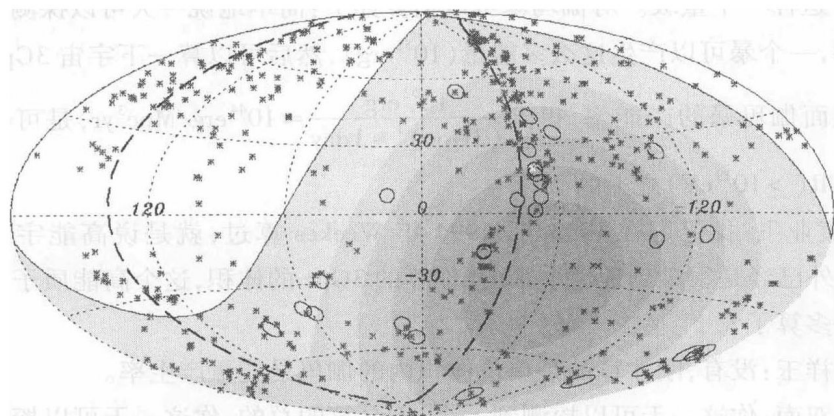


图5 Auger 发现了 UHECRs 的各向异性分布

然后说一下,如果说我们现在没有办法直接知道伽玛暴里有没有质子的成分,将来有可能用一个办法探测伽玛暴的高能中微子事件。高能中微子可以通过 $p\gamma \rightarrow \Delta^+ \rightarrow \frac{n\pi^+}{p\pi^0}$ 产生 π 介质,然后衰变成 e^+, v_e, ν 。探测 GRB 高能中微子的优势,因为伽玛暴的高能中微子在 TeV 以上,在此能端有一个大气的背景中微子的问题,但是探测伽玛暴高能中微子有个好处,就是伽玛暴发生在一个很窄的空间位置,在空间上的误差很小,伽玛暴的爆发时间也很小,这样的话去除背景是比较好的,所以找伽玛暴的中微子是很有利的。GRB 内激波的中微子,是 Waxman & Bahcall 1997 年,1999 年提出的,这个反应 $\gamma + p \rightarrow n + \pi^+; \pi^+ \rightarrow e^+ + v_e + v_\mu + \bar{v}_\mu$ 产生在共动系里面,在共动系里面满足的条件: $\left(\frac{\varepsilon_p}{\Gamma}\right)\left(\frac{\varepsilon_\gamma}{\Gamma}\right) \geq 0.3\text{GeV}^2$ 。如果有: $\varepsilon_\gamma = 1\text{MeV}, \Gamma = 10^{2.5}$,那么就有 $\varepsilon_p \geq 10^{16}\text{eV}, \varepsilon_\nu \geq 10^{14.5}\text{eV}$,这样产生的中微子一般在 100TeV 这个量级,这是能量很高的中微子。而算出来的效率(质子转化为 π)可以达到 $f_{p \rightarrow \pi} \approx 0.2$ 。所以估算把伽玛暴的贡献累加起来,大概每年平方公里中微子探测器可以探测 20 个这样的事件,这就是当初 Waxman 和 Bahcall 预言的流量。GRB 高能中微子辐射在其他过程里面会有,



包括 jet 穿过恒星包层时可能产生 shocks, 这样产生中微子是 TeV 中微子。在内激波里面产生的是 PeV 的中微子, 我们算一下, 如果有光球内的激波耗散就会产生 TeV 的中微子, 这个我稍微介绍一下。这个是由于伽玛暴有一些光谱分析发现支持存在着热辐射, 这表示耗散的区域是发生在光学厚的区域。光学厚的区域算质子产生的高能中微子辐射的话不仅要算质子与光子作用, 还要考虑质子跟质子本身的碰撞, 就是要算 pp 和 p γ 的各自贡献。我们发现 pp 过程产生的 TeV 中微子也能被 Icecube 这个高能中微子探测器给探测到。Icecube 是在南极洲建立一个中微子探测器, 它的完成要到 2011 年。一共有 84 个探测管, 现在已经建好 40 多个探测管。当时有 22 探测管时的结果发表在文章 arXiv:0907.2227 上。他们寻找了 41 GRBs 的中微子, 但都没有找到, 给出的上限都比较高。

最后归总一下, 高能光子是强子产生的吗? 目前还不支持这一点, 因为强子辐射的效率比较低。伽玛暴是不是极高能宇宙线源呢? 现在还没有很好的证据, 既不支持也不能排除, 仍然是一个候选者。我们需要寻找强子存在的证据, 那么高能光子在更高能是不是能找到, 我们还不知道? 但是一个可能的途径就是找高能中微子, 一旦找到就必然存在强子。如果找不到中微子, 也不能说一定不存在强子, 因为产生伽玛暴的高能中微子实际上是依赖于激波区域半径的, 这点我们知道的不是很清楚, 可能激波发生在很大的半径中, 本身产生的中微子就很弱。所以这个不知道, 这个将来会有很多仪器多波段的观测中也许会有很大的进展。像宇宙线为 Auger North、Icecube 在 2011 年会完成。

张 力:

你是简单地估算了质子的同步辐射, 我是这样想的, 原来用他写数据做的时候, 戴子高等对单个暴如果要是爆发一个很稠密的环境中以及星际密度比较密的情况下, 就可以解释; 如果把这样一个环境定位是一个高密度区, 会有怎样的情况呢?

王祥玉:

我说这个不是考虑环境因素的, 是考虑内部的。你说的伽玛暴物质与



外部介质作用,可以产生高能光子,但中微子有多强需要计算,因为外部的密度也不会太高。

王建成:

我觉得加速光子的过程中也会加速电子。

王祥云:

对,都会有。这两个成分会有个比例,通常假定均分。



会议时间

2009 年 7 月 18 日 上午 8:30 ~ 12:00

会议地点

昆明连云宾馆礼堂西四厅

主持人

张双南



AGN 的高能伽玛辐射机制问题

◎白金明

活动星系核是高能天体物理中的热点问题,而活动星系核中的热点问题之一就是伽玛辐射机制问题。近十多年来活动星系核研究领域的一项重大进展是美国的康普顿伽玛射线空间天文台(CGRO)和地面的大气切伦科夫成像望远镜(ACIT)的观测发现许多 blazar 是甚高能伽玛射线源。这一发现使人们认识到 blazar 的辐射有相当大一部分,有时甚至绝大部分,是以伽玛射线辐射出来的,认识到 blazar 的全波段能谱分布中有两个峰,对应了两种不同的辐射机制。Blazar 的高伽玛射线辐射光度和辐射流量的快速变化强烈支持 blazar 的伽玛射线辐射产生于相对论性喷流,且喷流的视角很小。

Blazar 连续谱辐射有很宽的能谱,从射电一直延伸到伽玛射线能段,能谱分布中有两个峰,对应了两个成分。第一个成分的峰在红外到 X 射线能区,第二个是在伽玛射线能区。例如,对 3C 279,在 20 世纪 90 年代之前只观测到低频峰这一部分,自从 CGRO 上天后,发现其大部分光度是以伽玛射线辐射出来的,而且辐射变化很快,伽玛射线光度比低能成分要高了 10 ~ 100 倍。对于另外一个源 Mrk 501,它的低能峰在 X 射线波段,低态和和高态时分别在软 X 和硬 X 能段,第二个峰在 TeV 能段。

在 blazar 多波段能谱中,从射电到光学辐射具有高度线偏振,表明是同步辐射,但是关于高能成分是什么样的机制产生的,目前争议很大,有很多种模型。从 Mrk 421 的多波段光变曲线来看,不同波段的辐射具有很好的相关性,这要求两个峰产生于相同的一群电子,而且意味着第二种成分很可能是产生第一峰的电子的逆康普顿散射。参与逆康普顿过程的种子光子目前还不清楚,它可能来自吸积盘、喷流、宽线区云,还有尘埃环等等,这是主流的观点,即轻子模型,该模型主要认为相对论性电子同步辐射产生第一个成分,逆康普顿散射产生第二个成分。还有人提出强子辐射,质子之间相互作用或质子与光子之间作



用产生 pion 介子,其衰变产生观测到的伽玛射线。

在轻子模型中,喷流的洛伦兹因子大约等于 10,该模型中电子通过某种机制被加速到相对论性能量,为幂率分布,它有一个极小能量和一个极大能量,这两个值现在也不好确定。对于这样的电子分布,能谱的低能峰由同步辐射产生,通过逆康普顿散射产生第二个成分,其种子光子及辐射区域在哪里,现在仍不清楚。如果辐射区域离吸积盘太近,辐射就出不来,须有一定的距离,如果在宽线区以内距吸积盘又不很远,那么吸积盘的光子对种子光子的贡献就不可忽略,宽线区散射的吸积盘等光子也会有很大的贡献。但是如果辐射区域在宽线区以外,就有可能种子光子来自于尘埃环,当然所有情况下同步光子都有贡献。同步光子有几种,一种是产生逆康普顿散射的电子是通过同步辐射产生的,另外一种是从前面的喷流产生的同步辐射光子。强子模型和这个模型类似,它不同之处是辐射粒子是高能电子和质子,其加速过程也不清楚。它的同步辐射也是电子产生的。不过它的第二个成分是由质子的一些过程产生。

2008 年 6 月份,美国发射了第二代的伽玛射线空间望远镜 Fermi,在其全天区图像中,blazar 3C 345 是点源里最亮的一个。模拟的全天可能探测的 γ 射线源大概有 9 000 多个,接近 10 000, Fermi 对伽玛射线的探测灵敏度提高了将近 100 倍,能谱范围非常宽,30 MeV ~ 300 GeV。300 GeV 和地面的切伦科夫望远镜的探测能区相衔接,这样就可以得到非常好的能谱和光变曲线,这样可以很好地研究高能辐射机制,有可能在未来几年,在 γ 射线辐射机制方面产生突破进展。

我们研究 γ 射线的热点问题就是要把握以下几个方面,一方面是种子光子的来源,另一方面是辐射产生区域(这两个问题是相关的)以及相对论喷流到底需要多快的速度,现在有很大的争议。在射电观测方面,新的射电源与伽玛射线的相关性需要研究。另外,不同种类的 blazar 有什么关系? 他们的伽玛射线辐射性质有什么区别? 有些 blazar 不是伽玛射线源,它们之间有什么关系等一些问题,还有就是喷流由什么组成? 是质子和电子,还是电子对,目前还有很大的争论。我们观测到是辐射,如果先把辐射机制确定出来,我们就可以对高能粒子的来源,也就是说粒子加速过程作进一步研究;加速过程本身就是一个辐射的过程,当然,加速后粒子继续还有辐射。如果对加速过程认识比较深、



比较全面,我们就有可能最后解决喷流如何产生,如何加速,也就是说喷流如何从黑洞吸积系统里面吸取能量。

研究 blazar 有什么意义?我觉得有这样几个意义:①blazar 的辐射由产生于相对论喷流的非热辐射占主导,blazar 的研究主要就是喷流的研究;②Blazar 从射电一直到高能伽玛射线的多波段能谱分布,不同 blazar 的能谱分布的变化趋势、偏振及其变化,光变(即辐射流量的变化)尤其是不同波段间相关的光变、能谱变化等观测结果为 blazar 喷流的结构和物理过程以及喷流与外部环境的相互作用研究提供了非常丰富而又重要的信息;③近年来,Chandra X 射线空间天文台的成功观测使得 blazar 喷流的多波段研究从秒差距尺度延伸到千秒差距尺度;④blazar 是研究喷流的天然实验室,blazar 以及其他射电噪活动星系核的研究将有助于最终解决喷流从黑洞提取的能量的物理机制。

张 力:

不管是对于 AGN,还是对于伽玛暴,在解释高能辐射时,都认为轻子模型是最好的,我们一直想把强子成分也加进去。

白金明:

轻子模型的论据比较充分,不排除有强子贡献,但是没有轻子贡献大。



太阳活动区物理的基本问题和有关理论模型在黑洞吸集盘喷流研究中的应用

◎ 林 隽

我今天讲的是太阳方面的问题。我们的主要兴趣在于太阳活动的物理问题,最近有些比较值得鼓舞的事件,就是我们把有关的结果和模型用到了研究与黑洞吸积盘有关的问题上。今天我要讲的除了我们在太阳活动区物理研究方面取得的成果之外,还有怎么具体地把这些成果应用到对黑洞吸积盘间歇性喷流的研究当中。

虽然太阳无论是从尺度还是能量方面,都比黑洞吸集盘小很多。但是,太阳是我们在观测中唯一可以分辨细节的恒星,它的上面有很多细节和过程是可以直接观测到的。这样我们可以把太阳作为一个很好的平台,来研究其他恒星和天体上有可能发生的类似的过程,并建立相关的理论和模型。

我首先讲几个太阳物理方面的问题。由于太阳物理跟人类生活,特别是现代化的生活越来越紧密,因此现代太阳物理研究有三大任务或方向。

第一个就是理解从太阳出来的不断变化的能量流和物质流,是怎么从太阳进入行星际空间,然后充满整个太阳系(或日球)范围的;第二个当我们了解了这个过程及其演化细节,我们还要了解这个过程背后物理的本质是什么?是什么更基本的过程控制着我们眼前的这些现象?当然,我们最终的目的就是要知道与这些过程和活动有关的能量转化和传输会对我们人类社会有什么影响,特别是对人类在太空中的活动有什么影响。目前许多国家,特别是几个大国投入了非常大的人力、物力和财力来研究上述这几个课题。前面两个部分做得已经比较深入,后面的一个问题,作为课题研究是最近这几年才开始的。

太阳上发生的一些现象为什么对我们来说会那么重要呢?首先,太阳每天给我们光明和温暖,直接和间接提供给我们人类消耗的 95% 以上的能量。另

外,以磁场能量快速转换和释放为特征的太阳活动或太阳爆发,不论是剧烈的还是不剧烈的,都会对地球环境产生不可忽视的影响。这种影响是通过与地球的磁场和大气相互作用而传到地球表面的。第三,研究太阳磁活动以及爆发可以给我们提供一个研究发生在宇宙其他天体上的类似过程的工作平台。

地球周围的磁场结构和环境大概是这样的一个状况。太阳上来的能量和物质首先碰到的是一个弓激波,它分开了地球的磁场范围和太阳的势力范围(图1),是太阳风和地球磁场相互作用的结果。太阳上面来的物质和能量流,通过弓激波与地球磁场相互作用传到地球上来。图1的右边部分是艺术家的作品,大致描述了地球磁场的位形。而太阳的影响则一直会传到范围达100个AU的空间(即日球)当中。在100AU附近,又有一个弓激波存在(图2)。这是太阳风和星际介质相互作用的产物。

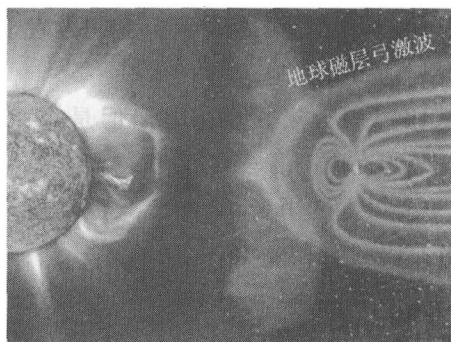


图1

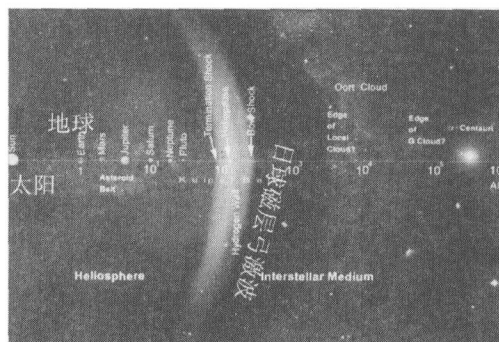


图2

在图1的左边部分是个真实的太阳磁活动和爆发过程,它的能量来源主要就是磁场,我们看不到磁场,但由于磁场对等离子体的约束,从等离子体的结构可以大致看出当地的磁场结构。而爆发过程的快慢就是由太阳上层大气,即日冕中的阿尔芬时间尺度决定的。在其他宇宙环境中,如中子星附近,可能爆发的速度会更快、更加猛烈。由于爆发过程是由不稳定性引起的,因此具有突发性和不可确定性。这就更显示出对太阳活动进行预报的实用意义。

在爆发的过程中,磁场能量被快速转化为等离子体的动能和热能,以及高能带电粒子的动能。太阳爆发过程中的喷射物(即日冕物质抛射,CME)的最大的速度是1000千米每秒的量级,抛出的物质大概是 $10^{15} \sim 10^{16}$ 克,动能和热



能大概均为 10^{32} 尔格的量级,克服的引力势能大概是 10^{31} 尔格,基本上最主要的能量是动能和热能。动能用于加速等离子体和带电粒子,形成 CME 和高速粒子流;热能用于加热大气,形成耀斑。整个过程涉及的平均的能量密度大概是 $100\text{erg}/\text{cm}^3$ 。

太阳大气当中为什么会发生这样的现象?这是因为太阳内部发电机过程不断把磁场从深的地方带出来放大,然后浮到表面,再形成各种各样的结构。图 3 是太阳内部和外部结构的示意图。主要的活动发生在大气里面,从光球到射球再到日冕,整个能量传播过程是这样的。由于在光球里面不停的物质运动,带着磁场集中到一个磁场比较强的区域,这就是黑子。在这个过程中,由于磁场是连接的、不会断的,因此光球里面的磁场运动肯定不可避免要带动日冕里面磁场的变化,这样的变化就会造成磁场的变形和挤压。这种变形和挤压产生的效果可以用弹簧来比喻:磁场就如同一个弹簧,或拉伸或挤压都会引起能量的积累。于是,变形的日冕磁场储存了来自光球的能量,当能量储存、积累到一定程度之后,由于系统的不稳定性,这些储存的能量就会快速释放出来,在周围介质当中造成剧烈扰动,并发展成为我们通常所说的爆发过程。观测表明,一般的典型爆发过程释放出的能量不会超过 10^{32} 尔格的量级,还没有观测到释放出的总能量达到 10^{33} 尔格的爆发。这一特点的物理本质目前还没有弄清楚,有可能和太阳的整体结构、光球物质密度、日冕物质密度以及太阳的较差自转速度有关。

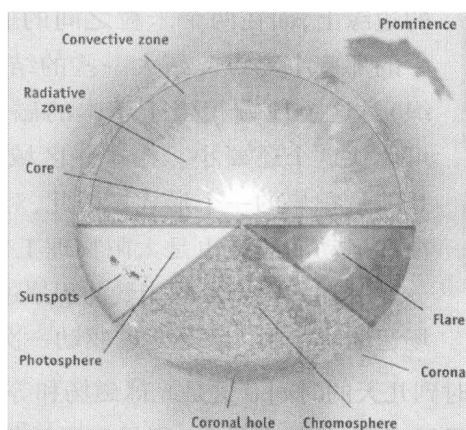


图 3

太阳内部发电过程的作用使得太阳的整体磁场能够保持在一定的水平上。在 500 万千米(大尺度)范围内,基本上是一个偶极场的结构,再近一点(3 万千米)我们看到很多很多的精细结构,这里面是多极的,由于磁场相互作用,相互的挤压,就有一个能量积累和传输的过程,然后再近一点(<1500 千米),我们看到的实际上是在单个米粒(即出现在光球层中的热对流元胞顶部)之间存在的磁单极结构(图 4)。在中子星和磁星周围的磁场据信也有类似的结构特征。这使得我们借鉴太阳活动区物理的研究方法和成果来研究在中子星、磁星以及其他天体上发生的磁活动成为可能。

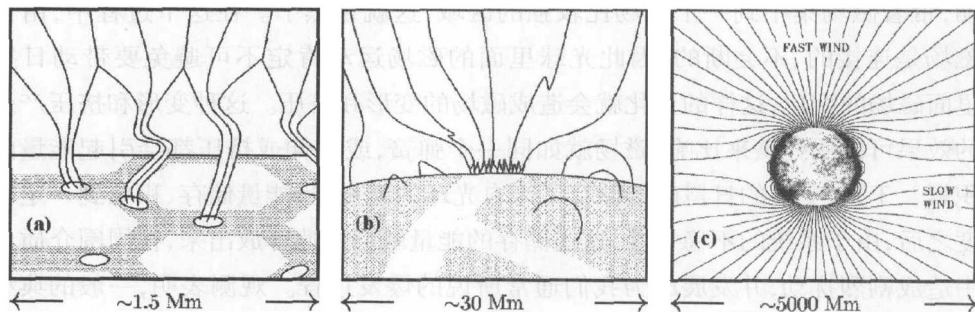


图 4

上面提到的单极结构很有意思,它不会在米粒的中间,也不会两个米粒的边缘上,而在两个米粒之间的通道中间出现(见图 5 中的那些小亮点。稍大一些的结构就是所谓的米粒组织)。这个地方相当于基本的磁源所在地。基本磁源可能比这个还要小。在这些区域中运动和相互作用都是能量积累的一个形式。因此,对这些小尺度的磁场特征和运动的研究也是太阳物理工作的一项重要内容。

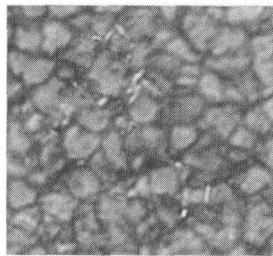


图 5

驱动一次爆发的能量的积累过程由光球内物质和磁场运动所控制。积累足够驱动一次典型爆发所需要的能量大概需要十几个小时到几天的时间。这是光球磁场和等离子体的阿尔芬时标。这是因为在磁化等离子体中,所有的能量转化、积累和释放都是由阿尔芬时标控制着的。当系统的演化到了能量释放的过程,其速度则由日冕里的阿尔芬时间尺度



所决定。由于日冕非常稀薄,其中的阿尔芬时标只有十几分钟到一小时。于是,一个完整的能量传输、转换和释放过程有两个阶段构成:缓慢而漫长的能量积累和快速而短暂的能量释放;而两个阶段之间的转化则由灾变(catastrophe)引起。在此基础上建立的理论和模型被称为太阳爆发的灾变理论和灾变模型。

灾变发生的同时系统也失去了原有的平衡,位于日冕当中的一部分包含有螺旋结构和等离子体的磁场被迅速向外抛出,爆发过程就此开始。灾变本身的发生可以不需要耗散磁场,这就是一个简单的机械能的转化。但是如果耗散完全不发生,那么进一步的演化最终就会被中止。这是因为如果磁场没有耗散,就如同弹簧拉不断,磁场结构总会找到一个新的平衡点而使刚开始的爆发过程停止下来,其具体的表现就是无耗散电流片的形成。由于磁场有一个内禀特性,就是它要保持它的拓扑结构不变的性质,即从一个位形演化到另一个位形的过程中如果没有耗散,那么它的拓扑结构是不会变的。因此在灾变过程中,磁场中出现的磁中性点就会演化为一条中性电流片。正是这条中性电流片的形成和发展会阻止系统的进一步演化。如果不耗散,它的下端会与太阳表面相连,由此产生的磁张力使得由灾变引起的整个系统的演化最终会在新的平衡点停下来。

当然,在实际过程中是不可能没有耗散的。特别是由等离子体不稳定性引起的耗散在其中起到了非常重要的作用。在灾变发生的过程中形成的中性电流片会变得很长。当电流片的长度超过其厚度的6倍之后,撕裂模不稳定性就会发生。这是一种长波不稳定性,由其引起的耗散速率一般都超过其他的耗散,而且对大尺度磁结构的耗散非常有效。因此,在实际爆发过程中形成的电流片都比较厚。其厚度可以达到上万甚至是十几万千米,而不是像许多实验室结果显示的那样只有几十或几百米。这是因为由撕裂模不稳定性造成的耗散效率很高,即使在厚电流片当中也可以将磁场足够快地耗散掉。

耗散的结果就是在电流片当中形成无数小尺度结构(见图6),引起磁场通过电流片改变拓扑结构。形象些讲,就是那些用于描述磁场走向和形状的磁力线在电流片当中

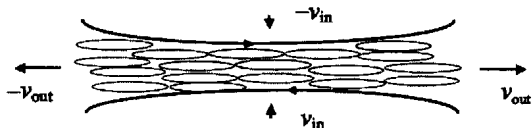


图6 电流片中形成的小尺度结构

断开之后又重新联上,并将磁场能量迅速转化为等离子体的动能和热能,以及

高能粒子的动能。这就是我们通常所说的磁重联过程。

磁重联的发生使得产生张力的那部分磁场被很快地耗散,相应的磁场能量被迅速转化为等离子体的热能和动能以及被加速的高能粒子的动能。其结果就是由灾变引起的运动和演化会继续进行下去并发展成为具有实际意义的爆发过程,而前面提到的被抛出去的螺旋状磁场结构和等离子体也会很快离开太阳,进入行星际空间。同时,一部分往下运动的等离子体、热传导前锋和高能粒子最终会到达太阳表面,加热色球,使色球蒸发,形成具有不同温度分布的明亮的耀斑环——高温环在外面,低温在里面,依次可以在软 X 射线、远紫外、紫外和可见光波段观测到。图 7 展示了一幅在典型爆发过程中通常出现的磁场结

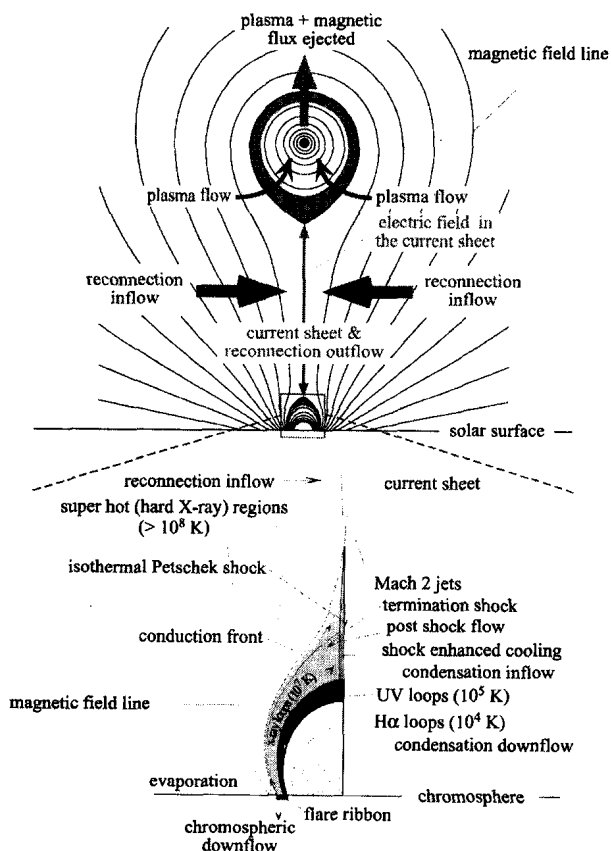


图 7 磁场结构的二维剖面

构的二维剖面。在此结构当中包含有 CME、耀斑和电流片。电流片既是能量转换区域,又是连接 CME 和耀斑的中介,是太阳爆发过程中一个非常重要的结构。目前对 CME - 耀斑电流片的研究已经在太阳物理领域当中形成了一个非常重要和引人注目的课题和方向。

磁重联过程的另外一个产物就是诱导电场(见图 8)。这个电场对加速带电粒子非常有效。带电粒子在电场被直接加速,其数目随能量的分布是个平谱。但当这些粒子在电流片当中运动时,它们会与由于不稳定性产生的湍流结构发生各种相互作用(见图 6)。通过这些相互作用,粒子能谱可以被调制成幂律谱。电流片当中的粒子加速也是我们目前研究的一个热点,但也遇到了比较大的挑战,那就是如何将发生在电流片内部的小尺度过程与发生在电流片周围的大尺度过程有机而自然地联系起来。目前还没有找到比较适用的路径。

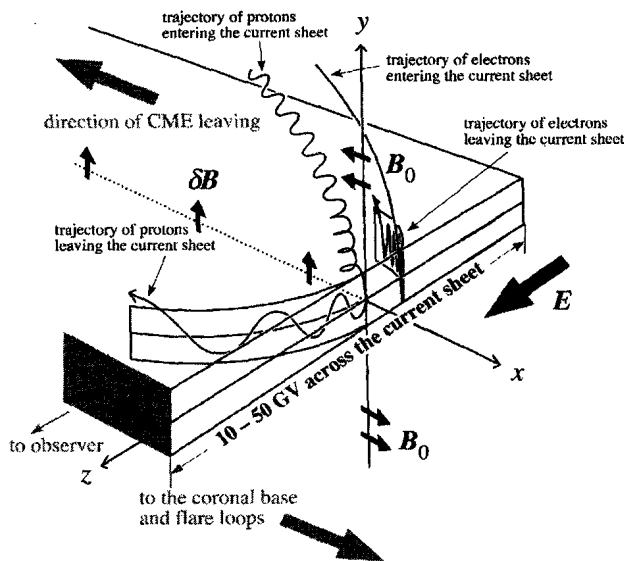


图 8

下面介绍一下我们与上海天文台袁峰研究员的合作。这个合作的目的是要把上述太阳爆发的理论模型应用到对黑洞吸积盘的间歇性喷流的研究当中。

同天体物理的其他领域内的研究相比,以太阳物理研究为背景和平台开展



的宇宙等离子体和 MHD 研究和取得的成果要全面、复杂和丰富得多。作为离我们最近的一颗恒星,太阳为我们提供了一个独一无二的宇宙等离子体和 MHD 的实验室,使我们在相关领域内的研究和实验受益匪浅。随着不同领域内研究方向、研究内容和研究结果的相互渗透,我们开始试探着将在太阳物理领域内发展出来的一些思想、方法和结果应用到天体物理的其他研究领域当中。将太阳爆发的灾变理论及其结果应用到对黑洞吸积盘间歇性喷流的研究当中,就是其中的一次尝试。喷流在天体物理吸积系统中普遍存在。大尺度的喷流一般是稳定和连续的。但是吸积系统中也存在着间歇性的、偶发的向外喷流并伴随耀斑辐射。一个比较典型的例子就是从 Sgr A* 出来的间歇性喷流。

在 Sgr A* 这个银河系中心存在的大质量黑洞周围,射电、红外和 X 射线耀斑每天都发生几次,不同波段光变曲线的峰值表现出时间上的延迟。这些延迟和快速上升、缓慢衰减的亮度以及耀斑辐射的偏振,都被认为是吸积流的等离子体抛射和膨胀引起的。对活动星系 3C 120 超过 3 年的 X 射线和射电观测结果也表现出间歇性喷流的特征,它以超光速亮结的形式存在。在活动星系核中,这种亮结在喷流中非常普遍。

银河系的微类星体也曾被观测到类似的等离子体抛射,如 GRS 1915 + 105, GRO J1655 + 40, 和 XTEJ1550 + 564。伴随着 X 射线耀斑 (GRS 1915 + 105 还有红外耀斑) 的短促的强射电耀斑主要在 HXR 光谱态到 SXR 光谱态的转换中被观测到。与发生在 Sgr A* 中的爆发情况相同,这些耀斑一般伴随着等离子体团块的抛射。

间歇性等离子体抛射 (喷流) 的特征和稳定连续的喷流之间的特征具有明显区别。间歇性喷流发生在 X 射线辐射的硬谱和软谱的转换过程中,而连续的喷流仅在硬谱态中被观测到。观测通常表明间歇性喷流的洛仑兹因子较大。它们的光谱变化很快并且辐射是光学薄的,这与连续喷流不透明的亮射电辐射相反。有证据表明,被抛射出的等离子体的辐射比连续喷流的辐射具有更高的偏振度。这表明间歇性抛射出来的等离子体与磁场的关系很密切。

吸积流的 MHD 数值模拟结果表明爆发式的物质抛射会嵌在稳定、连续的喷流状外流中。间歇性喷流事件往往是准周期性的,相继两次抛射之间的时间间隔约为 $1600 GM/c^3$, 其中 G , c 和 M 分别为引力常数,光速和黑洞质量。选择



Sgr A* 的参数计算出的时间间隔大约为 6 小时。如果我们假设每次强度足够高的耀斑都与抛射事件相伴,计算出的时标与目前的观测是符合的。

连续喷流的形成及其机制已被广泛研究,人们建立了很多模型,已经知道了它们与大尺度磁场有关。但导致等离子团的间歇性喷射现象的物理本质还属未知。最近,通过与太阳的 CME 进行类比,我们提出了从黑洞产生的与吸积流当中的闭合磁场有关的间歇性喷流的 MHD 模型。

这样做的依据有两个:首先,在黑洞周围的厚吸集盘中,高温使得其中的物质大部分电离,形成等离子体盘。磁场与等离子体的冻结使得磁场可以在具有较差转动的吸集流中被放大并被送入吸集盘冕当中。进入冕中的磁场并不会停止演化,随着其足点在盘中的运动以及一些等离子体不稳定性的发生,很有可能在冕当中形成与日珥类似的磁通量绳的结构(图 9a)。

这一过程伴随着磁场能量和磁螺度的传输和积累。正如我们前面所提到的,在具有螺旋状磁场结构存在的系统当中,边界条件的改变不一定会立即造成系统平衡的失去。系统可以以准静态方式演化,而平衡状态也可以持续一段时间以积累更多的能量和螺度。不过随着能量和螺度的积累到了临界点或临界状态,系统的进一步演化或对系统的任何扰动就会立即导致灾变的发生,直接的后果就是等离子体和磁场结构的突然抛出和耀斑的产生(图 9b)。

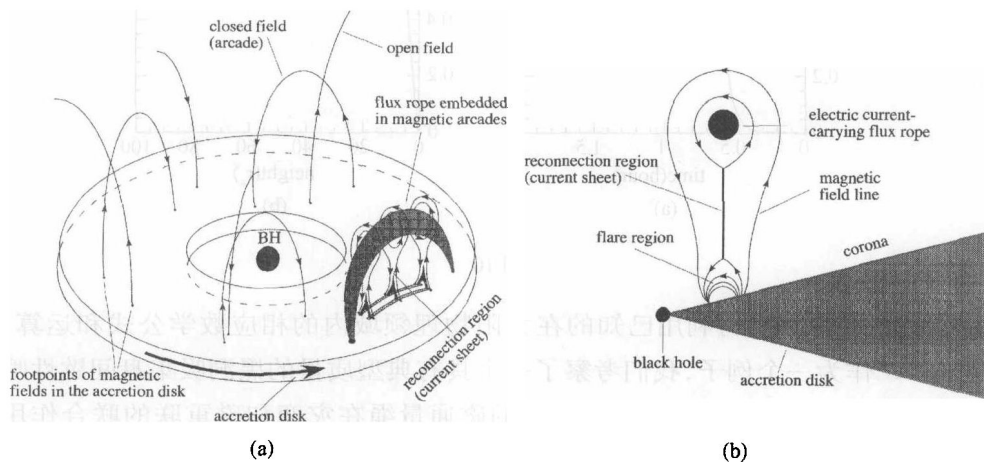


图 9

其次,由 Sgr A* 的参数计算出的间歇性喷流的特征时间间隔为 6 小时左右,这与太阳活动峰年期间典型爆发之间的平均时间间隔相当。当然,主要还是前一个因素决定了二者在物理上的相似性。因此,我们根据对目前太阳环境下磁场结构和磁通量抛射的理解,寻求建立黑洞吸积盘磁场和物质抛射模型的途径。

在实际的吸积盘冕当中,磁通量绳的结构不会一直稳定地存在下去,当能量和螺度的积累超过阈值,系统的平衡就会被破坏,磁通量绳会以灾变的形式被抛出去。随后磁场被严重地拉伸,一个中性区域——电流片随即在相反极性的磁场之间形成。由等离子体不稳定性引起的耗散使得快速磁重联在电流片当中发生。这个过程极大地削弱了磁张力并帮助磁压力顺利地把磁通量绳推离吸积盘,形成 CME。一方面,磁重联把储存的磁场能量转化成等离子体微观粒子的动能,产生耀斑辐射;另一方面,它把磁能转化成等离子体动能并促使 CME 传播。这就像在微类星体和 Sgr A* 上观测到的那样,表明耀斑不仅是纯粹的辐射过程,它还具有动力学特征。这可以对耀斑伴随的物质抛射事件提供合理的说明。

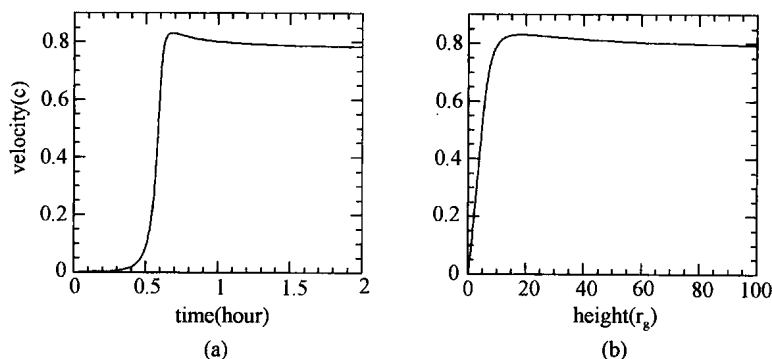


图 10

根据以上讨论,再利用已知的在太阳物理领域内的相应数学公式和运算,以 Sgr A* 作为一个例子,我们考察了一个具有典型质量的黑洞吸积盘间歇性喷流的运动特征。结果发现失去平衡后的磁通量绳在灾变和磁重联的联合作用下,其速度可以在 10 几分钟之内从 $0.05c$ 增加到 $0.8c$ (图 10)。图 10a 描述了速度随时间的变化,而图 10b 则是相应的速度随垂直距离的演化。二者均表明



显著的加速暗示了这种能量释放过程的突发性,也非常符合间歇性喷流的观测特征。

王 陈:

我问两个问题,你刚才说的耀斑的能量是 10^{32} ,是什么机制把它限制在 10^{32} 。

林 隼:

我估计太阳的这个结构只有那么大的容量,只能容纳那么多的能量。这是一个很好的问题,将作为我们下一步研究的目标。可能解析解做不出来,要借助于数字模拟。它应该与等离子体的密度、磁场强度和光球物质的运动有关系。具体的细节还要等数值模拟的结果。

王 陈:

你这能量大部分是磁能?

林 隼:

不是大部分,全部都是磁能。

王 陈:

第二个问题是你的耀斑在爆发时候看到的辐射是不是全波段的?

林 隼:

全波段的。

王 陈:

然后它的辐射是不是偏振的?

林 隼:

是的,有比较强的偏振。

王 陈:

是线偏振吗?

林 隼:

线偏振和圆偏振都有。观测到吸积盘出来的间接性喷流中的光辐射有较强的偏振,而连续喷流的偏振就不明显。因此,我们推测间接性喷流肯定是跟磁场绞在一起的。

宋黎明:

爆发的能谱是热谱还是非热谱?

林 隼:

有热谱也有非热谱。非热谱主要是韧致辐射,因为磁场不强,回旋辐射或其他的辐射不是太强,主要是韧致辐射。首先磁重联会直接加热等离子体;其次,当高能粒子打到比较密的低层大气里面会产生韧致辐射,同时损失的一部分动能还会转化为热能。而当能量特别高的时候,我们还可以观测到 γ 射线,特别是中子线(2.22 MeV)也经常出现。

王建民:

CME 的过程对这个米粒结构是否有严重影响?

林 隼:

米粒子是布满在整个太阳表面的,基本上存在几十分钟就消失了,新的米粒组织又出现了。CME 对其没有影响。CME 过程主要发生在日冕里面,其影响基本上到不了光球这个层面。但如果特别强的耀斑,如白光耀斑,则有可能到达这个层面。但影响基本上就是加热,对结构本身自己没有什么



影响。观测特征就是比别的地方亮一些。

袁为民：

实际上磁重联在吸积盘里面的过程已经讨论了很多时间了，冕的加热问题就是靠这个模型，你刚才说2003年左右就是用磁重联的过程来解释冕的加热，这样也避免了吸积盘中心的形成日冕。

林 隽：

实际上对爆发而言，我们最希望的是磁结构的不稳定。在光球层当中，不稳定性可以把磁场带出来并放大，形成我们所需要的结构。只有这种自闭合的磁场围绕一团等离子体的结构出现之后，才会出现灾变式的演化而引起爆发。一般简单的结构，不管怎么演变也不会出现灾变，除非在某处突然引进一个磁重联。所以在吸积盘里面无论发生不稳定性也好，发生磁重联也好，都是我们所希望看到的。

袁业飞：

我想问一下，你加速的时标是多少，想比较一下，因为ADAF盘它的径向速度很大，若抛出，我想考虑的主要是垂直的速度。

林 隽：

对，基本上主要是垂直吸积盘表面的速度。

袁业飞：

但是吸积流是径向运动的，接近光速了，你这里径向速度是不是很大的。

林 隽：

我们没有考虑径向速度，只考虑了垂直速度。



王建民:

突然发生大规模的 CME 过程,对太阳表面有没有影响。

林 隽:

没有,但是如果不发生磁通量的抛射,太阳自转最后会变成刚体运动,磁场就会全部消失。所以到一定时候,磁场就会抛出来,才能够让它接着转动下去。实际爆发过程本身,对里面自转没有直接影响,但是这个是必须要发生的,才能让能量的转化一直进行下去。

张 力:

你可以让你的学生其了解一下 Ruderman 1991 年关于中子星磁多极场的相关知识,会很有启发的。

林 隽:

谢谢你的建议。



LAMOST 类星体研究

◎ 吴学兵

刚才大家讨论得很激烈,现在我要一下子从最近的太阳跨到最远的类星体上面去了。这与我国正在进行的一个大规模的 LAMOST 项目有关,是一个非常重要的事情,也是我国天文界目前最大的项目。首先 LAMOST 团队需要很多人来参加,这不像以前的研究只由几个人合作写论文就可以的。到目前为止,中国天文最大的项目就是它,所以这是值得我们花一点时间,甚至是 10 年时间的。当然我的研究兴趣还是跟高能辐射有联系的。所以让我向大家介绍一些 LAMOST 类星体相关的研究,以及我的想法。很多人在这个 LAMOST 类星体项目一开始就在工作,付出了很多的努力,包括在座的袁为民研究员。其他人也付出了很大的劳动,所以非常感谢他们。

我主要介绍两个方面的内容:一个是 LAMOST 研究的重要性,还有一个就是我们类星体研究的内容。LAMOST 的重要性我想介绍下几个方面的内容:一个是 LAMOST 简介,我们都非常了解 LAMOST,所以我只作简单介绍;第二个我想介绍类星体研究的意义;第三个介绍一下国际上已有的类星体巡天,目前能做到什么样的程度;第四个是 LAMOST 开展类星体巡天的优势。

从 LAMOST 的结构示意图(见图 1)可以看到,LAMOST 的整个设计和一些其他的望远镜不同。我们知道望远镜有两种,一种是反射式的,另一种是折射式的。LAMOST 是非常新型的设计,这是中国科学家创造出来的。现在凡是看到这种望远镜都称之为 LAMOST 类型望远镜,这是中国天文学家很大的一个成就。LAMOST 实际上有很重要的两个关键技术,一个是主动光学,另外一个就是多光纤,光纤的数目有多少呢? 4000 多根,所以现在这个光纤数是世界第一。利用 LAMOST 做的河外星系的巡天主要是两块,一块是在北天区的巡天,另外一个是在南天区。现在我们还在讨论是不是分浅场和深场两组来做,这依

赖于 LAMOST 最后的观测本领,目前还不知道,因为还在测试阶段。可能先做一个浅的巡天,然后如果条件允许的话我们可以做更深的巡天。

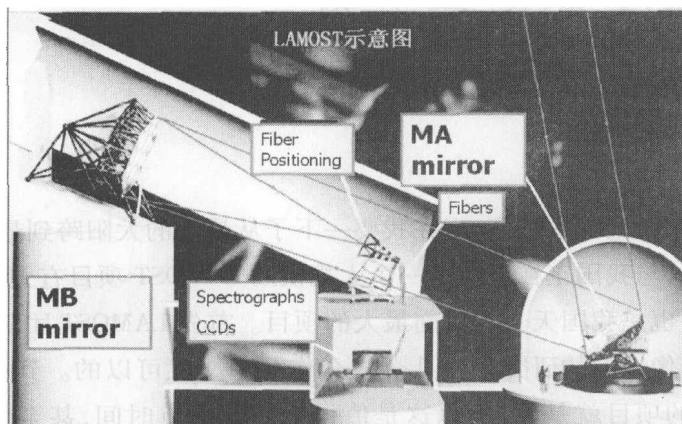


图1 LAMOST 示意图

LAMOST 已经拍了类星体光谱,现在光纤对准的效率已经好了许多,未来 LAMOST 巡天的曝光时间是 60 ~ 90 分钟,所以原则上可以拍得更深。对于类星体可以很容易看到有很强的发射线,所以如果只看发射线的话,做一个类星体红移巡天是一点问题也没有的。当然,如果光谱定标以后,看起来会更好。

类星体研究的意义是什么呢? 实际上类星体就是类似于恒星的天体,它不是恒星,是非常远的天体。看一下 3C 273 这个有名的类星体,一般的望远镜拍的像就和恒星一样,但用大望远镜拍的时候很多细节就出来了。类星体的物理图像也很简单,其中心是一个黑洞,有吸积盘,有宽发射线区和尘埃环,有喷流。这是大家理解类星体的物理本质最重要的一些因素。那么和我们高能辐射有关的问题就是,类星体高光度的能源机制是什么? 现在普遍认为是围绕中心超大质量黑洞的吸积过程所释放的巨大引力能。

类星体在高红移处(宇宙早期)距离很远时都可以被看见,因此它们是宇宙早期能被探测到的极少数的天体之一,它为研究宇宙的结构和演化提供了一个很好的探针。类星体由于很亮,利用它们可以研究宇宙大尺度的结构。

类星体本身也可能是星系演化过程的一个重要阶段,考虑 AGN 的反馈作用,反馈作用会影响星系的形成与演化。这使得类星体研究也成为星系宇宙学

研究领域的一个重要内容。那么国际上已有的类星体巡天有哪些呢？首先是1963年发现的第一个类星体。20世纪70年代做的亮类星体巡天，发现100个类星体。然后是80年代做的一个大的亮类星体巡天，发现1000个类星体，澳大利亚的科学家在90年代做的亮于21等的2DF巡天，发现了2万个类星体。最成功的当然是美国的SDSS，经过1万多平方度的巡天发现了10万多个类星体。SDSS类星体巡天的星等极限是19.1等，高红移时更深一些。LAMOST类星体巡天的目标是超过SDSS，所以我们获得的类星体样本应该至少比SDSS大4倍。一旦我们这个目标实现，肯定是世界上最大的类星体样本。LAMOST进行类星体巡天有没有自己的优势呢？这是很明显的，LAMOST的视场很大，大概是25平方度，另外，口径是4米。SDSS大概只有几百根光纤，而LAMOST有4000根光纤。光谱的拍摄效率是世界上最高的，做光谱观测是很有优势的。类星体相比星系有更多的强发射线，所以类星体巡天有很大的优势，非常适合发挥LAMOST的特点，容易在天光比较亮的情况下把发射线找出来。所以我们LAMOST类星体研究，预计将发现40万个类星体，比现在类星体数量扩大3~4倍，成为世界上最大的类星体样本。将以前所未有的精度给出光学类星体在红移0~6之间的光度函数，由于是最大的样本，所以将在类星体物理和宇宙学研究等方面得到更精确的结果。

下面我们谈一下LAMOST类星体研究的内容，有五个方面：①比SDSS光谱巡天深1~2等左右的类星体候选取；②对SDSS在红移在2~3.5之间的类星体选源的缺陷的弥补；③光度函数比SDSS在暗端的改进与黑洞吸积历史的研究；④多波段的类星体证认。现在有很多的星表，可以用来证认多波段类星体，还有从这些里面找到特殊的类星体；⑤利用最大的样本可以研究类星体是否成团。这个成团性甚至可以用来研究暗能量。

那么第一是要选择比SDSS光谱巡天深1~2等左右的类星体候选体($19.1 < i < 20.5$)。SDSS选择类星体的方法是排除法，因为宇宙中的点源除了恒星就是类星体。在双色图上恒星是很规则分布的，在图上把它们挖掉，剩下的就是类星体。排除法好的地方是找到类星体的成功率非常高。恒星挖掉后，百分之七八十是类星体。当然有些白矮星和类星体很相似，所以我们可以顺便得到最多的白矮星的样本。排除法有什么坏处呢？有些类星体的颜色跟恒星是一

样的。挖掉恒星时 also 把这些类星体挖掉了,所以这是排除法不好的地方。目前我们已做了三种输入星表的比较。类星体的观测不能把所有的点源都拍光谱,这是不可能做到的,所以只能选那些可能像类星体的源,把它们编入输入星表。那么现在有 3 种方法:①直接的方法,就是把恒星挖掉,把星等放暗一个星等,我们已经找了 50 万个候选体;②国家天文台做的聚类分析,用的是 clustering algorithm 方法,把已有的恒星星系类星体数据都读进去,然后用分析方法后确定恒星,星系的聚类,靠近类星体聚类的作为类星体候选体;③用贝叶斯统计,其实原理也是一样的。先选择已知的样本算先验概率,然后读测光数据,如果计算出是类星体的贝叶斯概率大于 0.5、0.6 的就列为类星体候选体。美国的 Richards 也做了,我们从中选的是亮于 20.5 星等的源。但是比较一下,这三个星表都不重合。我们曾期待大多数应重合,现在是不一样的,重合的只占 $1/4$,即 25%。

对选源方法我们还要做进一步地比较。我们已对 2SLAQ 天区做了一个比较,相对来说这一个比较暗的、实际上也比较好的小天区,我们做了一个 18 ~ 21.85 星等范围的类星体候选体的比较,这里面有 3 000 多个类星体,我们看 3 种方法重现了多少。结果是 Richards 的方法似乎最好,但这里面有很多问题我们现在还未解决。我估计 2010 年将会做一个小天区的测试,把所有的点源都拍光谱,然后用这 3 种方法来比,这是更直接的检验,最后确定哪种方法最好。第二个问题是关于在双色图上挖掉的部分,挖掉部分恒星的颜色刚好是跟类星体在红移 2 ~ 3.5 的颜色很相似,所以在做完完备性检验的时候这个红移段是很低的。在红移为 2.7 附近,只有 10% 的完备性。原因就是挖掉了跟恒星颜色差不多的类星体。那怎么把这些类星体找回来,光从光学波段想办法是不行的。如红移为 3 的类星体与恒星的光学颜色是一样的,所以挖恒星的时候把类星体也给去掉了。但在红外波段它们是有差异的,恒星比类星体还是要暗的,所以通过红外颜色可以把类星体找回来。

英国的 UKIDSS 巡天要做五个波段近红外巡天,我们感兴趣的是 LAS 的巡天,有 YJHK 四个波段,可以利用红外颜色来帮助我们选类星体候选体,在 SDSS 做过的天区也能把那些丢掉的类星体找回来。我画了一个红外—光学的双色图(见图 2),对高红移也是适用的。在这个图上类星体、星系和恒星可以利用红外的颜色把它们区分开来。包括一些高红移的类星体(红移大于 3 的)



都可以找回来,所以我觉得这种方法是非常有希望的。

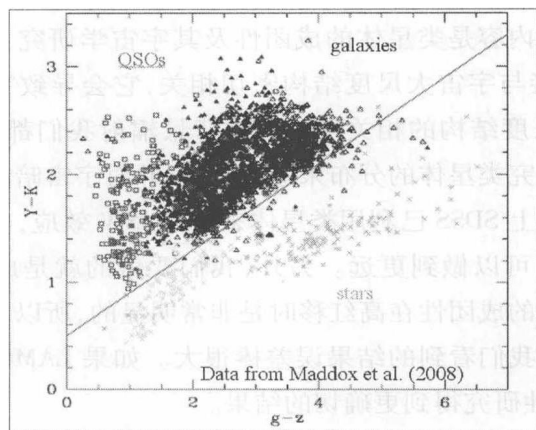


图2 红外—光学双色图

第三个内容是要得到更好的类星体的光度函数。SDSS 是目前最大的类星体样本,其中 90% 的类星体是红移小于 2 的。因此他们确定的光度函数只有在红移小于 2 时才是适用的,大于 2 时是很不确定。如果我们有一个更好的类星体样本,就会在光度函数研究上有一个很大的改进,至少是一个星等的改进。如果有类星体的光谱,还可以做很多事情,比如说可以算中心黑洞的质量;如果得到了几十万个体星体的黑洞质量,再利用得到的类星体光度函数,我们可以研究从红移 6 到近邻宇宙类星体的黑洞吸积和演化历史。

第四个内容是寻找多波段类星体。我们可以多波段的类星体测光资料来帮助寻找多波段类星体。在射电波段,现在我们用的是 FIRST,它的天区与我们的巡天天区吻合得非常好,而且深度也够。在红外波段现在用的是 UKIDSS,这个是近红外。日本也有 AKARI 卫星数据,但是现在还没发表;美国现在也在提 WISE,是一个宽波段的红外卫星,用 1~2 年的时间来做巡天。

紫外没有特别好的巡天,X 射线现在也没有特别好的巡天。X 射线以后会有一个非常好的巡天的,如德国的 eROSITA,但具体进展不知道怎么样了,我国的 HXMT 希望能早点发射。用这些数据可以找多波段类星体,只要用多波段星表和我们的样本进行交叉,然后从这里面还可以找到很多特殊的类星体。比如

Type II 类星体、宽吸收线类星体,窄线 Seyfert I 类型的类星体,双峰发射线类星体等都可以找到。

最后一个研究内容是类星体的成团性及其宇宙学研究。类星体在不同红移处的成团性直接与宇宙大尺度结构密切相关,它会导致宇宙微波背景辐射(CMB)和宇宙大尺度结构的相关性。微波背景辐射我们都知道,宇宙大尺度结构也可以通过研究类星体的分布来进行分析,并对宇宙暗能量的理论模型提出限制。现在实际上 SDSS 已利用类星体来研究 ISW 效应,他们已经做到红移 1.5,但是 LAMOST 可以做到更远。另外,我们要做的就是成团性研究。SDSS 的研究发现类星体的成团性在高红移时是非常明显的,所以对大尺度结构研究有重要意义。当然我们看到的误差棒很大。如果 LAMOST 结果的误差棒很小,就会对成团性研究得到更确切的结果。

LAMOST 整个巡天计划刚刚在一个月前通过了国际评估,LAMOST 巡天将能够提供一个世界上最大的类星体样本,而且利用英国 UKIDSS 巡天的数据有助于我们解决好 SDSS 类星体巡天中的一些问题。但 LAMOST 类星体研究绝不是一个人能做的,我认为需要 100 个人来做,所以我希望全国所有的天文同行共同来做。

韩金林:

这个聚类方法与前面的方法也差不多?

吴学兵:

是差不多,实际上这个聚类方法的本质和第一种方法都是一样的。

韩金林:

这个聚类也是用几个波段的星等颜色吗?

吴学兵:

原则上是他们比我们的方法要好,因为我们在二维图上找聚类,他们是四维的。

韩金林:

他们是四维的而不是两维的?

吴学兵:

对,两维的一个带。我们也有其他不同的方法,原理是差不多的。

韩金林:

实际上就是不管你是几维的,能把类星体挖出来就行。

吴学兵:

对,相当于是这样。

王建民:

你们是用模拟的还是真正的数据?

吴学兵:

真正的数据。

袁为民:

我也有个愚蠢的问题,既然 LAMOST 要做类星体巡天,可否与做恒星的巡天一起做?

吴学兵:

这只能做某一个星等范围内的。恒星太多,极限亮度是 19 等的恒星就做不完。这个望远镜的巡天时间是固定的,是 5 年。

王建成:

这个跟星表有关系吗? 为什么会不一样?

吴学兵:

现在的问题是实际上重合的只有 $1/4$, 所以我们要找出究竟是什么问题导致的。

林 隼:

WISE 好像是 2009 年要上天吧?

吴学兵:

对。

白金明:

你当时提的类星体巡天, 我觉得还有一个比较有意义的事情。我们可不可以对宇宙大范围的弥漫介质做一些研究, 比如研究它们在近邻宇宙或远处是否一样?

吴学兵:

这曾经是 LAMOST 主要的科学目标之一, 但是 LAMOST 有它的问题, 因为它的光谱分辨率取多少还在讨论。如果要做更多的源, 光谱分辨率就不能太高, 如果太高就只能做很少的源。所以这个分辨率 R 是 1000 还是 2000 仍在讨论。如果是 2000, 我们还要删掉很多源; 如果是 1000, 还可以做更多源的红移观测, 所以现在倾向于我们还是测红移为主。研究宇宙吸收线实际上还是有困难的, 现在取 $R = 1000$, 不太适合做吸收线研究。

白金明:

我觉得 LAMOST 可以观测到很多高红移的吸收线。

吴学兵:

这是没问题的, 但是做吸收线只能做一部分天体, 因为对信噪比的要求



比较高。但吸收线研究不是我们研究的主要内容。

王祥玉：

我有两个问题，第一个就是如何把红移 2~3 的类星体都测出来，LAMOST 如何做？

吴学兵：

我们现在打算就是利用红外的方法来找这些红移 2~3 的类星体，但是现在还没有做完。英国 UKIDSS 团队也有类似的计划，但他们用的是澳大利亚的 AAT 望远镜，它只能拍一个小天区。不能像我们的 LAMOST 这样可以在大天区来寻找这些类星体。

王祥玉：

我的第二个问题，就是现在已经发现了 10 万个类星体，LAMOST 想发现 40 万个，在统计上有何意义？

吴学兵：

我刚才已经显示过了，我们在光度函数上至少有一个星等的改进。SDSS 只能做到深度为 19.1 等的光度函数，LAMOST 会做到 20.5 等，从星等上就深了 1 个星等。样本扩大 4 倍以后导致相应的误差棒也会小了，这在高红移时的区别是非常大的。



暗物质研究和电子超出及其解释

◎毕效军

我将介绍暗物质研究的进展和最近宇宙线实验里几个新的发现,就是正负电子比预期的结果要高出许多。暗物质问题天文学家在研究,物理学家也在研究它。我将从一个物理研究人员的角度来介绍一下暗物质研究。

利用星系团的 X 射线辐射的轮廓图、星系的旋转曲线、CMB 观测等,我们知道了宇宙中存在很多的暗物质。今天建立了标准的宇宙学模型,可以告诉我们宇宙中有约 73% 的暗能量和约 23% 的暗物质。作为物理研究可能要问的一个问题,我们知道宇宙中有这么多的暗物质,那么暗物质是什么样的粒子、有什么质量、相互作用如何,这些就是做物理研究要问的问题了。当然,到现在为止,对暗物质的性质的了解还非常不清楚,但是天文观测告诉我们,暗物质是冷的,其运动速度要远远低于光速、非重子等,这些性质都和它的粒子物理性质相关。

我们研究微观世界,认为所有的物质是由轻子和夸克组成的,有弱相互作用强相互作用和电磁相互作用三种相互作用。但是引力一直是不能用量子场来描述,我们描述微观世界用量子力学,引力则是爱因斯坦的广义相对论。现在量子物理和广义相对论还不能协调,所以标准模型是非常成功的模型,但还是一个不完备的理论,即引力理论还不能够容纳到里面去。

那暗物质粒子究竟是什么粒子呢? 粒子物理学家提出了很多很多理论模型,具体的模型就不介绍了,但是有一个观点我要说一下:粒子物理的标准模型是非常成功的一个模型,描述了我们现在所观测到的所有的粒子物理现象,所有的数据都可以很精确的描述,但是人们也认为它是不完备的理论,引力也不可能统一起来。人们试图构造新物理,超出标准模型以外的模型,这在这些模型中,会很自然地存在一些中性、稳定的粒子,这些粒子就形成了暗物质。因此,



宇宙当中存在暗物质是很自然了,如果不存在反而不自然了。这是因为,我们基于目前的一些数据所建立的标准模型,不可能是自然界终极的理论,必然会有新的理论出现,新理论一般会预言暗物质存在,如果认为标准模型就是最终的理论,这是非常奇怪的一个事情。

我们做粒子物理怎么限制暗物质的性质呢?有一种暗物质是非常自然的暗物质的候选者,即弱作用重粒子(WIMP)。这个暗物质是随着宇宙的演化自然保存下来的,在早期宇宙温度非常高的时候,就会产生暗物质出来,暗物质也变成标准模型的粒子,暗物质和其他物质达到热平衡。如果暗物质粒子脱离平衡,它的丰度分布大概是这样变化的。这个演化的过程就跟微波背景结果是一样的,我们可以去严格计算它,就会发现如果要求遗留下来的暗物质和我们观测到的暗物质一致,得出来的暗物质和我们已知物质的相互作用强度大约就是弱相互作用。这样一种暗物质就叫做 WIMP,它是非常自然的暗物质候选者,它的存在就像微波背景辐射随着宇宙演化遗留下来的遗迹一样。

现在粒子物理学家研究暗物质粒子的性质,主要靠两类实验探测方法,一种叫做间接的探测,就是探测暗物质粒子湮灭到标准模型粒子的产物。比如前面我说的宇宙线电子能谱的测量,就是属于这类探测。去年因为发现正电子超出现象,觉得这个超出可能跟暗物质湮灭过程有关联,所以才备受关注,成为非常热门的研究课题。另外一种是直接探测方法,既把探测器放在很深的地下实验室里以把宇宙线屏蔽掉,来探测暗物质粒子和探测器碰撞后所产生的信号。可以根据这种信号的强度和谱型来推测暗物质的性质。

下面我就主要介绍一下最新的几个宇宙线实验的结果,这几个结果都发现了一些异常的现象,它们被认为有可能和暗物质有关联。气球实验 ATIC 和卫星实验 PAMELA 的结果都发表在 Nature 上,从 2008 年 10 月份 PAMELA 公布结果以来,现在已经有 260 次以上的引用率,所以我们看到围绕着这个宇宙线的现象讨论非常的多。这个实验结果大概是这样的,PAMELA 给出的是正负电子的比例,图 1(左)中给出了实验数据点及理论预期的实线。宇宙线理论中,我们预期银河系里面的宇宙线会与星系气体相互作用以后产生次级的正电子,标准的宇宙线理论预期是这样的一个形状,但是实验测量是这样的?在 10GeV 以上我们看到有一个明显的超出。怎么理解这个超出呢?这是现在研究关注



的一个焦点。此外, PAMELA 还测了反质子的比例, 和原有的实验数据符合得非常好(如图 1 右所示), 同时这个宇宙线与星际介质的相互作用得到的结果跟实验数据符合的非常好。所以结果就是反质子符合得非常好, 但是正电子明显超出的现象。ATIC 是美国的一个在南极飞行的气球实验, 图 2(左)是 ATIC 测得的电子能谱。ATIC 的正负电子没法分开, 因此它测的是正负电子合在一起的能谱, 实线是我们通常预期的本底电子能谱, 在 $300\text{GeV} \sim 800\text{GeV}$ 之间数据明显超出了本底, 而且它测量的超出有一个非常特别的结构在这里面, 在 600GeV 这里有一个尖(然后)一下子就掉下来, 所以 ATIC 的测量结果如果是对的话, 天体物理的源就很难解释。正因为如此, 大家都把它想成与暗物质的相关, 如果是暗物质产生的源, 就应该是这个样子, 很自然就解释了这个能谱的形状。但是 2009 年 5 月份美国的一个卫星实验 Fermi 也测量了电子的能谱, 它的电子谱就平滑了很多, 没有 ATIC 的那个尖了, 当然超出依然存在, 如图 2(右)所示。HESS 是一个地面伽马射线望远镜, 它可以测到更高的能量, 但是它不能给出任何决定性的结论, 因为它毕竟是地面实验, 有大气层的扰动造成的系统误差。

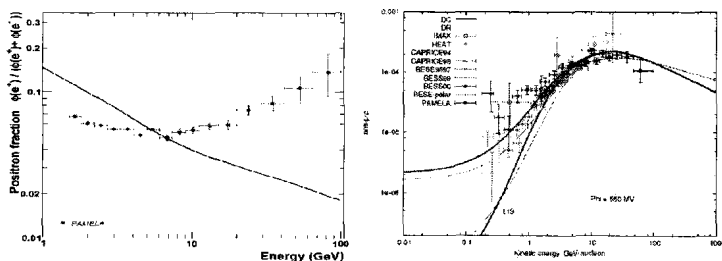


图 1 PAMELA 的观测结果。(左)正电子占电子的比例及理论预言值;
(右)质子的观测结果与以前的结果比较

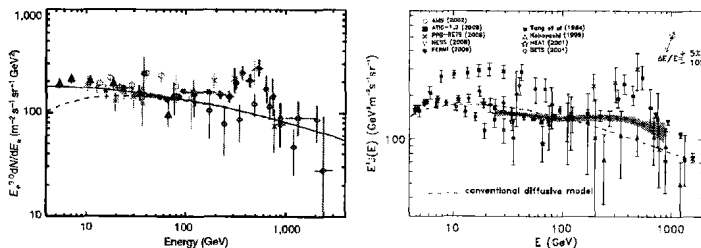


图 2 (左)ATIC 的观测结果(图中的实心圆点);(右)Fermi 及其他探测器的观测结果



下面我们介绍一些针对这些实验现状的理论解释。首先是用天体物理解释,比如有人重新算了本底,得出结论因为宇宙线传播过程的误差太大,所以本底应该有一个很宽的范围,而不是一条线,如果是这样的就可能没有超出。但据说,PAMELA 已经得到了电子本底的新的数据,只是还没有正式地发表,如果把这个结果考虑进去,因为卫星实验误差要小得多,结果发现超出还是存在。另外一种解释就是从加速源上面考虑,加速后的宇宙线和周围介质的相互作用,这样他们发现考虑源上的正电子后大概可以解释 PAMELA 的数据,而且给出来的正负电子的总能谱也与 Fermi 符合得非常好。当然考虑这样的过程以后,也会有反质子产生的相应的过程,所以他们也预言了反质子的能谱。这个结果要等 PAMELA 新的数据来检验它。

此外,高能所的胡红波和他的学生也考虑了正负电子超出和宇宙线膝区的关系?就是考虑宇宙线加速源上加速的质子和周围的背景上的光子相互作用,光子是可见光,发现对产生过程的阈能正好在膝的位置上,仔细做 simulation 发现这个过程产生的正负电子如果有 3% 能够跑出来,并贡献到地球的观测就可以比较好的解释 PAMELA 和 Fermi 的结果了。但是要解释 ATIC 的这个尖,还是比较困难。当然更多的解释还是用 PULSARS 来解释,在距离地球比较近的地方有几个年轻的脉冲星存在,这些 Pulsars 能够辐射出能量较高的正负电子出来,如果传播到地球就可以解释现在的数据。Pulsar 辐射方面云大的张力教授是专家,他们早期的一些工作就考虑了这种可能性。

总结一下,天体物理的起源给大家提了很多的可能性,但是要解释 ATIC 还不是很容易,解释 Fermi 是比较容易,此外更多的文章是和暗物质相关了。定量的计算发现,如果用暗物质来解释现在的数据要求暗物质性质和原来理解的暗物质性质相差很多。比如因为数据中只有正电子超出,没有反质子超出,所以要求暗物质只能湮灭到轻子,不能湮灭到夸克。此外,还要求暗物质的湮灭截面非常非常大,比通常大家认为的湮灭截面要大上千倍。怎么让暗物质今天的湮灭截面比它们在宇宙早期的截面大得多呢?现在文献中考虑较多的一种机制是索末菲效应,这个可以用一个经典的例子做个比喻。比如扔一块石头经过地球,如果你扔的速度很快,它就直接飞出去了,如果速度很慢,它的路径就会在引力作用下弯曲和地球碰撞,因此石头和地球碰撞的截面是和它的运行速



度相关的。所谓的索末菲效应,就是上面这个例子的量子对应。如果暗物质粒子之间也有这个长程的吸引作用,在宇宙的早期,暗物质粒子温度很高的时候,跑的非常快,截面就很小,现在温度很低了,湮灭截面就非常大。这个机制受到很多的关注,包括美国一个实验组在设法进行实验来寻找类似这样的效应。

当然如果真的是暗物质解释了宇宙线的现象,我们对暗物质的性质就会有一些明确的限制,比如湮灭到夸克的分支比要小于 10%,或者小于百分之多少。现在有一个问题就是说,我们既有天体物理的起源,也有暗物质的起源,我们有没有办法去区分不同的解释呢?像用 Pulsar 辐射或者暗物质湮灭、暗物质衰变来解释实验数据,我们有没有办法区分和鉴别这些不同的理论模型呢?我们曾经做了一个工作,试图找到区分它们的办法。我们考虑不同的源它们的空间分布是不一样的,Pulsar 分布在银盘上,是这样一种分布,如果是暗物质,它们是球对称分布,如常用的 NFW 模型,它在银心的密度就会更高,所以我们看到不同的起源就会在银心有非常大的差别。如果能够测量不同源在银心的贡献就能区分不同的起源,但是由于电子能损是非常快的,银心的正负电子无法传播到地球上。我们计算了电子所产生的同步辐射和逆康普顿过程,通过观测这些辐射来间接测量正负电子。从这个结果来看暗物质湮没或者衰变和 Pulsar,它们的能谱包括随着经纬度的分布是非常不一样的。还有它们通过逆康普顿过程产生的 γ 射线,刚好是在 Fermi 的能区,Fermi 如果做一个仔细的观测,就可以看到这个跟预言非常不一样。当然文献中还有其他的一些工作,也提出其他的办法来鉴别不同的模型,不再一一介绍。

因为现在暗物质来解释数据要求暗物质的湮灭速度非常快,这样可能会导致一些问题出来,比如在银心的方向会有很强的 γ 射线辐射,而 HESS 已经观测了银心的 γ 射线辐射,所以这对暗物质形成很强的限制。对 clusters 观测同样会对暗物质湮灭过程给出很强的限制,最后我们得出来一个结论,如果是暗物质解释了正电子超出,暗物质性质似乎不应该是冷暗物质,因为冷暗物质的分布结构非常多,银心非常的尖,这样产生了过多的 γ 射线。似乎只有温的暗物质才不会导致出这样的问题。所有这些都是对暗物质性质给出的限制。



时变观测应成为中国高能天体物理观测研究的主要发展方向之一

◎ 卢方军

我觉得从我们观测的角度来说,时变的观测应该是我们将来高能天体物理的主要研究方向。

我主要的观点有四个:①天体 X 射线时变观测,这个时变不仅指流强的随时间变化,也指光谱的时间变化,是研究极端条件下物理规律的重要手段。加强对天体的时变性质研究与国家相关的科学规划的要求相一致;②我国在 X 射线时变探测和数据处理方面有比较好的课题思想基础,而且有良好的技术积累;③选择 X 射线时变作为主要的观测研究方向可以避免与欧美等国直接竞争;④我们提出 X 射线时变和偏振探测卫星 XTP 的规划,作为 HXMT 后我国的一颗重要的 X 射线天文卫星,它在多波段时变观测和对弥散热气体的观测方面具有很强的能力。

在回忆论文集“*X-ray Timing 2003*”里,F. K. Lamb 提出了一些与 X-ray Timing 相关的科学问题,包括非常高密度物质的性质、状态方程,强引力场中物质的性质,强磁场条件下的量子电动力学效应,以及其他的一些非常基本的物理问题,还包括一些天体物理的问题,包括黑洞和中子星自旋等,我这里就不一一叙述了。这些问题是一些基本的物理和天体物理问题,对它们的研究可以推动天体物理学整体向前发展。

我国在天体的 X 射线时变研究上具有很好的理论和数据处理基础,这些研究也与我国相关的科学发展规划相一致,主要有三点:①我们有一批顶尖的高能天体物理学家主要从事或曾经从事 X 射线时变研究,取得过开创性的成果。这包括研究吸积盘理论和从事 X 射线数据分析等与观测相关的研究的专家,就人数来说在高能天体物理里面是比较多的;②在我国很多的院校和科研

单位,包括清华大学、北京大学、南京大学、北京师范大学、华中科大、华中师大、上海天文台、国家天文台、高能所等单位都有人在从事 X 射线时变研究;③我们在时变分析方法方面曾有过大量创新。

从另外的一个角度来说,《空间科学项目中长期发展规划研究》和《天体物理发展战略规划》这些规划给我们指引了方向,它们都将 X 射线时变的研究作为了解极端条件下的物理规律以及探索恒星和星系演化的一个重要工具。

我国在 X 射线时变观测方面具有良好的技术积累,并且很快将有进一步提高的机会。首先,HXMT 的主要科学目标之一就是观测黑洞、中子星等高能辐射天体的多波段快速光变和宽波段能谱,研究在黑洞、中子星附近极端条件下物质的动力学和高能辐射过程。HXMT 将为未来的时变观测研究新项目奠定重要的技术基础。其次,中法天文卫星——空间变源监视器 SVOM 的主要目标也是伽玛射线暴的观测和亮的 X 射线双星的时变监测。最后,也是最重要的一点,时变所依赖的半导体探测器,如 Si-PIN、SDD 等器件预期可以在较短的时间内实现国产化,从而大幅度降低仪器的成本。这些探测器的主要性能,如能量分辨率,已与国际先进水平相当,它们的时间分辨率也非常的好,从而能得到高质量的数据。

选择 X 射线时变作为主要的观测研究方向可以避免与欧美等国直接竞争。面向新世纪,美国 NASA 制订了超越爱因斯坦计划 (Beyond Einstein Program),它主要是研究三个问题,包括宇宙大爆炸、暗能量的本质以及黑洞周围的物理过程。在超越爱因斯坦计划中,最重要的 X 射线卫星项目就是 Constellation-X。同时,ESA 也推出了一个计划,主要的项目是 XEUS,它通过 X 射线观测研究在整个宇宙尺度上天体性质和物质组成的演化过程。由于 Constellation-X 和 XEUS 等大型项目的科学目标非常相同,2008 年 7 月,ESA、NASA、JAXA 宣布在这些项目提案的基础上建造国际自外天文台 (International X-ray Observatory) IXO,IXO 将采用焦距 20 ~ 25 米的可延伸的单桶望远镜,焦平面探测器包括一个宽视场成像光谱仪、一个高分辨的非衍射光谱仪、光栅光谱仪或其他一些可能的探测器。IXO 是 2020 年前后国际上最重要的 X 射线天文台,它的主要手段是从光谱的角度对天体进行观测,研究的主要科学问题是极端的物理过程和宇宙的形成及演化。预计在 2020 年左右发射,像如此大的项目,具有很大

的技术挑战性,往往会拖后。

以 IXO 为代表的国际上新一代高能天文卫星,其主要特点首先是将研究黑洞物理、宇宙的大尺度结构、演化、暗物质、暗能量和极端条件下的物理规律作为主要的科学目标;将观测扩充到硬 X 射线能区($\sim 30\text{keV}$),因为到了这个能区热辐射的影响比较小,就可以研究高能的、非热的物理过程;此外,新一代的高能天文卫星探测灵敏度比以往卫星提高一个数量级以上,这将通过采用大的探测面积和聚焦成像来实现,像 IXO 的面积在 3 平方米左右,同时采用量能器或劳厄衍射技术以获得高的能量分辨率。

我们提出的 X 射线时变和偏振探测卫星 XTP,是作为 HXMT 后我国主导的一颗 X 射线天文卫星。它在多波段时变观测和对弥散热气体的观测方面具有强大的功能并且与国外相比具有优势。XTP 是一个宽波段的 X 射线望远镜,其主要科学目标是研究 X 射线天体的多波段快速光变,同时 XTP 还可以研究宇宙弥散 X 射线辐射以及伽玛射线暴和亮的 X 射线源的偏振。预计 XTP 有效载荷总重 5000kg 左右,直径 4.5m,整星重量 15t 左右。图 1 是它的有效载荷组成:

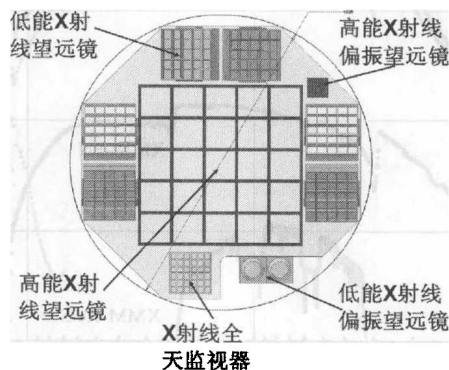


图 1 XTP 有效载荷的组成

其中的 X 射线的全天监视器,可以对暴发天体进行观测,同时也可以探测 γ 射线暴,高能 X 射线偏振望远镜可以观测到伽玛射线的偏振。低能 X 射线望远镜由六个单体来组成,每个低能 X 射线望远镜的探测面积为 4000cm^2 ,采用

扫式电荷器件 SCD(与 HXMT/LE 相同),能量分辨率约 130 eV,时间分辨率约 1ms。六台低能 X 射线望远镜可以观测同一目标,也可以指向不同的方向同时观测几个天体。低能 X 射线望远镜的这种模块化设计,从航天的角度来说,提高了可靠性。XTP 低能 X 射线望远镜的能量分辨率是 130 eV,与 Chandra 的能量是相当的。高能 X 射线望远镜的工作能段更高,超过 30 keV,计划采用 Si-PIN 或 SDD 探测器,时间分辨率优于 20 微秒。全天监视器是一个编码孔径探测器,高能 X 射线偏振望远镜跟载人航天二期天宫实验室上的 POLAR 项目类似,但规模是 POLAR 的 4 倍,可以探测到更多 γ 射线爆的偏振,而且可以把偏振度测到更高的精度。低能 X 射线偏振望远镜指向和高能 X 射线望远镜相同,主要用于对亮源的偏振观测,拟由意大利空间局研制,与他们原拟安装在 HXMT 上的偏振望远镜相同。同时,清华大学也正在发展相关的探测技术。图 2 是 XTP 和 XEUS(与 IXO 相当)探测面积的比较。

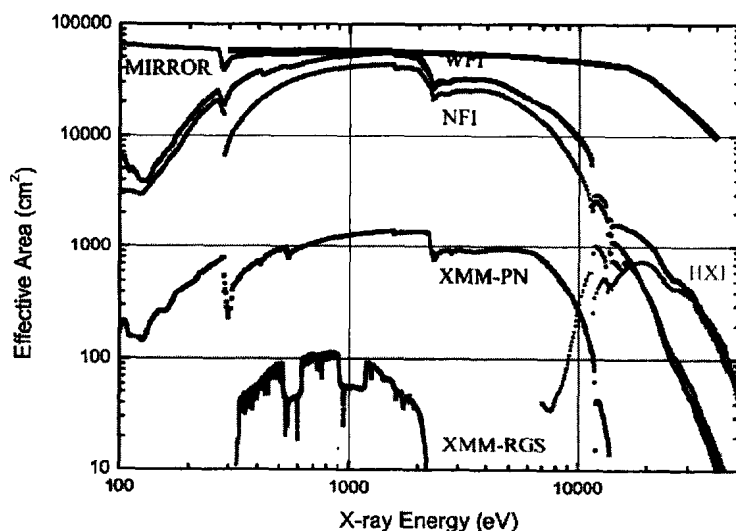


图 2 XTP 和 XEVS 探测面积比较

IXO 面积在低能时面积很大,但是大于 2 keV 就下降了,因为 IXO 是用聚焦成像的技术,随着能量升高会降低,现在多层镀膜的技术,可以在高能的时候具有收集的能力,但是会降低成像的精度。IXO 需要观测遥远宇宙的暗弱天



体,又不能降低成像精度,所以在高能和我们相比就是弱势。

XTP 的科学目标如下:①通过对 X 射线双星和亮的活动星系核的观测,研究极端条件下物质的行为和物理规律,包括在强引力场、强磁场下物质的运动规律和基本物理过程以及在高密度下物质的状态方程;②观测弥散 X 射线辐射,研究银河系内热气体和中性气体的分布以及低能宇宙线的密度,研究宇宙 X 射线背景;③测量伽玛射线暴的偏振 X 射线辐射,研究伽玛射线的辐射机制。

美国 RXTE 卫星的观测表明,对于黑洞双星系统最主要观测特征之一的准周期振荡(QPO)现象,其振幅在 10 keV 以上迅速增加,说明在此能量段 QPO 现象更加明显,辐射区更靠近黑洞。

至目前为止,对天体 10 keV 以上的硬 X 射线快速光变的研究还基本是空白,只有美国的 RXTE 卫星利用能量分辨率低的气体室探测器做过一些初步研究。XTP 的探测面积均比 RXTE 高 10 倍以上,能量分辨率也会更高,预期将在对黑洞系统的硬 X 射线光变研究方面做出更好的结果。

对弥散 X 射线辐射的研究能力方面的比较,用探测几何因子来描述,我们高两个量级,所以 XTP 该方面的能力是非常强大的。

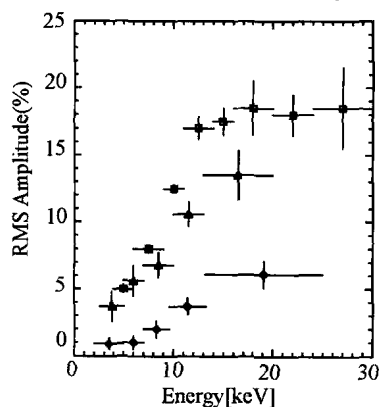


图3 黑洞双星系统的准周期振荡
振幅随能量的变化

表1 XTP 卫星和其他几个弥散 X 射线辐射观测卫星在曝光因子方面的比较

卫星	XMM-Newton (pn + MOS)	Chandra (ACIS-I)	IXO (WFI)	MAXI (SSC)	eROSTTA	XTP
探测几何因子 ($\text{cm}^2 \text{deg}^2$, @ 2keV)	500	28	802	675	700	60000

我们用蒙特卡罗方法模拟了对伽玛射线暴偏振的探测。下表是通过一年的观测,XTP 可以看到的伽玛射线暴偏振的数目与最小可测偏振度之间的关系。

表 2 XTP 对伽玛射线暴偏振的探测能力

最小可测偏振度	2.5%	5%	7.5%	10%	12.5%	15%
可观测 GRB 的数量	3	13	24	37	49	60

XTP 的卫星平台是根据国家下一代卫星平台发展规划提出来的,航天五院已经列了有关 XTP 卫星总体技术研究的自主创新项目,以更全面的考虑 XTP 卫星的总体技术。

从有效载荷方面,首先是探测器技术,主要探测器技术继承 HXMT 卫星的相关技术,另一方面它构成很大的探测面积,就需要用一个芯片读出很多的探测器,只有这样才能实现在低噪音的前提下进行高灵敏度的观测。在这个方面应用了专用集成电路 ASIC。HXMT/ME 和 POLAR 上已经成功使用了 ASIC 芯片,而且有很好的性能匹配的电路。

从科学研究看,XTP 是我国目前正在开展的几个空间项目科学研究目标的进一步发展。现在这几个空间项目的工作可以看作 XTP 的探路者。我们估计 XTP 的项目经费约 20 亿元,在正式上卫星工程之前有大量的预研工作,我们很希望国内的天文学家参加。

我现在想谈一下有关超新星遗迹的两个问题,我们现在观测的辐射和能谱,分辨率非常好。能谱发射线可以清晰地探测到,给我们研究超新星遗迹内

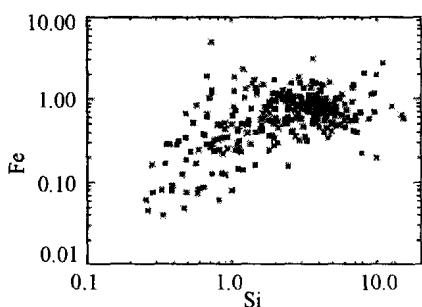


图 4 Cas A 硅元素和铁元素的丰度关系图

的元素分布提供了重要的工具。比如对于 SNR Cas A,铁和硅的分布是明显不一样的,由于硅和铁是 II 型超新星爆发的产物,所以他们在恒星内部分布的层不一样,另外可能爆发的机制也不一样。我们以前做一个工作,就是把 SNR 分成不同的区域,考虑每一个区域的金属元素的分布,我们就可以看到不同的分布有什么相关的信息,图 4 是 Cas A 硅元素和铁元素的丰度关系图。

可以看出,在硅丰度 2 个太阳丰度以下,两种元素丰度正相关,再往上会有



一个负相关,这个是怎么造成的,我们投稿到 *ApJ*,他们始终不认为我们这个是一个负相关。我觉得这个问题隐含的科学问题很重要,这是否对应着爆炸核合成的证据。我们知道,爆炸核合成是产生重元素的重要方式,但从观测上区分重元素是恒星演化的过程中合成的还是爆炸合成的,是很困难的事。因为两种核合成都可以合成重元素,有人甚至怀疑到底爆炸能否合成重元素。我们认为,这种硅和铁元素丰度的负相关就是由超新星爆发造成的,现在的理论是硅和硫燃烧生成铁,这样的话在硅多的区域,它的铁元素就少,就造成了这样一个负相关。前面的正相关是反映了我们被激波扫过的星际介质。我们还在进一步研究,如何确认我们的发现,并且给出合理的物理解释。

另一个问题与 Tych 超新星遗迹有关,我们从不同元素谱线发射强度的分布来看,元素越轻它的分布半径越大,和恒星内部结构的洋葱模型相同,但这确实是恒星内部结构导致的吗?非常值得怀疑。在恒星上面的层结构大概是不到一个太阳半径,在 SNR 是光年的量级,这样的分布反映的应是不同壳层运动速度的差别,如果是从中心爆发的话,怎么能够使它的外部获得更高的速度?也就是爆炸的地方物质运动速度慢,外面物质的运动速度快的速度结构是如何造成的?从另一个角度看,内层的铁线辐射需要很高的激发温度,而外层的镁等元素的激发温度就低得多,这有可能是反向激波造成的。反向激波从外层往里传播,反向激波按照以前的估计,是越来越加速的,所以会造成越往内就速度越高,温度越高,所以激发出更重元素的谱线。通过能谱拟合我们发现,拟合出的元素丰度并没有这样的规律,但谱线的等值宽度图却有这样的结构,印证了上述想法。

白金明:

这些空间计划与地面的多波段观测有没有联系。

卢方军:

现在上海天文台的余文飞在做这些事情,他希望同步的多波段观测。现在我国还没有自己的卫星,还谈不到和地面望远镜的配合,而光学望远镜看到的,比如双星系统,主要的辐射来自于正常星,而 X 射线主要看到的是

致密星周围吸积盘的辐射,尤其是靠近致密星的内层的吸积盘的辐射。显然从时间上应存在一个 timelag,但是怎么做是一个问题。

张 力:

对于 X 射线时变不是我们不想做,而是找不到人,建议多给我们培养一些相关领域的人才。

梁恩维:

XTP 上的全天监视器跟 SWIFT/BAT 的目标上面是否有一点不同?

卢方军:

SWIFT 现在在天上运行,但几年后就可能无法工作了。XTP 预计在 10 年后发射,为了给主望远镜寻找有意义的观测目标,卫星上仍然应该具备亮源监测能力。



X 射线双星中 SPL 态的 X 射线起源问题

◎ 王建成

我的报告是关于 X 射线双星中 SPL 态的 X 射线起源问题,这个问题最初观测到以后就一直引起争论,焦点问题是什么机制引起那么陡的陡谱态,陡谱态一般出现在黑洞选 X 射线双星中,在讨论之前,我们简单介绍一下黑洞选的 X 射线双星,它是黑洞和伴星组成的双星系统,黑洞吸积伴星的物质,形成吸积盘和喷流,与活动星系核的构型差不多。目前很确认的黑洞选 X 射线双星有 20 多个,这是其中的一个列表,最著名天体是 Cyg-X1,它常出现不同的 X 射线辐射态。下面我简单介绍一下 X 射线双星的辐射态。第一种是硬态,其 X 射线光度低,辐射中幂律成分占主导,辐射谱较硬,但到 100keV 左右就截断了;第二种是软态,其 X 射线光度较高,辐射中热成分占主导,辐射谱较软;第三种是中间态,陡谱态就是其中一种,它的 X 射线光度大,辐射谱很陡,而且可延伸到 MeV。X 射线双星的 X 射线辐射常表现 QPO 光变,对于不同的态,QPO 光变性质不同,有些源在陡谱态时具有高频 QPO,在硬态时出现低频 QPO,但在软态时 QPO 却消失了。现在我们要问这样的陡谱是怎么形成的?

2004 年,Zar 提出了一个模型,他们认为硬 X 射线是由盘上的软光子,经过冕中的非热电子散射而产生。要使硬 X 射线延伸到 MEV,就必须有大量的高能非热电子,那么这非热电子怎么产生?他们做了各种各样的假设,而且几何结构非常复杂。另外,这个模型无法解释 QPO 现象,即为什么硬 X 射线与 QPO 联系在一起?X 射线是软光子的康普顿硬化产生,硬光子应该在冕的外区产生,如果 QPO 表征不稳定性导致盘的不稳定性或者其他不稳定性,在光子传输的过程中,康普顿化的过程,就会把整个 QPO 的结构特征磨平掉。但现在已经发现 QPO 有很多特征结构出现,所以他们的模型基本不能解释 QPO。

现在我介绍模型的基本图像:X 射线的辐射区位于黑洞附近,辐射由相对论电

子的同步辐射产生,从几个 keV 一直延伸到 MeV,这个谱是比较硬的,硬光子在往外传播过程中,将与大量的热电子或者冷电子碰撞,被康普顿软化,形成较陡的谱。

下面我们考察同步辐射是否有效。首先估算一下黑洞附近的磁场大小,就可判断同步辐射的有效性。由 X 射线光度 L , 磁场可估算为: $B = \left(\frac{8\pi\epsilon_B L}{f R_b^2 c \delta^4} \right)^{1/2}$, 其中 ϵ_B 是磁能比率系数, R_b 是辐射区的尺度, f 是辐射效率, δ 是辐射区 Lorentz 因子。然后,我们估算动力学时标 t_d 和同步辐射时标 t_{syn} 之比:

$$\frac{t_{syn}}{t_d} = \frac{6\pi m_e c}{\sigma_T \gamma B^2} = 3.0 \times 10^{-3} \left(\frac{L}{L_{Edd}} \right)^{-1} \left(\frac{R_b}{R_g} \right) \left(\frac{f}{\epsilon_B} \right) \gamma^{-1} \delta^4$$

可以看到同步时标远远低于动力学时标,表明同步辐射很有效的(在黑洞附近)。 t_{syn}/t_d 显著依赖于 δ 因子,我们需要估算 δ 的大小,辐射区绕着黑洞旋转,靠近黑洞附近它的轨道速度是: $v_\phi = \frac{r \sin i}{2\pi(r^{3/2} \pm a)}$, 其中 a 是黑洞的自旋参量,在最内稳定轨道半径处 $v_\phi < 0.9c$, 因此, $\delta < 2$, 所以这个因子在前面估算磁场的时候,它的影响很小,基本上可以不考虑。

同步辐射由辐射区的高能电子产生,而高能电子通常由激波产生,我们估算辐射区中电子的能量有多大,这个能量很简单可以估算出来,最后计算它对应的同步辐射频率。从两个时标 $t_{acc} = \eta \frac{\gamma m_e c}{e B_\perp}$ 和 $t_{syn} = \frac{6\pi m_e c}{\sigma_T \gamma B^2}$, 可估算电子的

大能量: $\gamma_0 = \sqrt{\frac{6\pi e}{\sigma_T}} B^{-1/2} \eta^{-1/2}$, 对应的同步辐射频率为: $\epsilon_0 = \frac{3e B \hbar \gamma_0^2}{4\pi m_e c} =$

$\frac{9}{4\alpha_f} m_e c^2 \eta^{-1} = 160 \eta^{-1} \text{ MeV}$, 其中 η 是激波加速的效率因子,它通常大于 10, 因此,产生的同步辐射可以延伸到 MeV。一般来讲,激波加速的电子谱指数在 2.5 ~ 3.0, 其对应的同步辐射谱指数在 1.7 ~ 2.0。但我们观测到的谱相当软, 大概在 2.4 ~ 3.0。产生的硬谱在传播出来的过程中,受到周围电子的康普顿软化,关键是康普顿化的整个光深要相当大,这个完全可以估算的,只要电子的密度较密,可以使高能谱变软,并且谱指数要增加 1。因为同步辐射产生在很内区,如果那个区域绕着黑洞旋转, QPO 就自然可以解释。最后的结论是: X 射线主要由同步辐射产生,它可以一直延伸到 MeV, 然后通过康普顿软化过程使

得这个谱变得很软。辐射区很靠近黑洞,表现出高频的 QPO,具有史瓦西半径的尺度,要求高磁化,这样才能使同步辐射相当有效。另外 X 射线辐射流量相当高,它与总光度成正比,所以这类天体在高态时流量大,容易满足同步辐射的条件,在辐射转移的过程中,通过康普顿软化,更容易产生陡谱。

张双南:

你认为 QPO 的幅度和展宽都跟能量是有关系? 低能段应该是看不到 QPO 的,如观测数据上看到的情况。

王建成:

已经有人专门做数值模拟,得到 QPO 的一些性质,与观测符合,模拟结果要求辐射区靠近黑洞附近。

张双南:

因为我们以前确实是看到过这个 QPO,它的幅度随着能量的增加是增加的,跟我说的是一致的,就是说在这个态是不是也是这样?

王建民:

我觉得在高态的时候,即吸积率偏高的时候,要产生对内区非热电子的影响,你现在就是想用非热的电子。

王建成:

就是在很靠近黑洞的那个地方形成这样一个辐射区,先产生同步辐射,这个谱很硬,在往外传播过程中软化,然后才被观测到。

王建民:

我觉得这缺乏一种基本点,费米加速不是比较同步辐射的时标,而是电子的加速时标。我最后产生的阶段应该在哪个阶段。

卢方军:

你这个同步辐射大概是多长呢?

王建成:

我是直接估算的动力学时标和同步辐射的时标。

卢方军:

你是靠什么来估算呢? 然后那个谱指数是 $\gamma + 1$ 还是什么? 我有这么一个电子谱, 实际上电子在逃离前能量还没有损失掉, 如果电子在逃出之前, 已经完全损失掉, 就应该考虑加速效应。

王建成:

我考虑的是辐射区有这样的能谱, 没有涉及电子最后逃逸, 这个不需要考虑, 因为在辐射区电子很快产生 X 射线, 辐射损失时标远小于逃逸时标。

卢方军:

电子必须经过辐射区。

王建成:

不是, 电子在辐射区很快辐射损失。

徐仁新:

实际上我们做了辐射区下落的演化, 在此过程中辐射区没有热成分是不完整的, 你没有涉及热辐射。

王建成:

的确是这样, 我们不知道如何考虑。



Blazars 中的对产生过程

◎ 王建民

提到高能天体物理中的热点问题,使我想提出一些若干年前的研究。今天我讲一下 Blazar 里的 Pair-production 和它的一些应用。图 1 是一个从射电一直到 TeV 特征化的 Blazar 的宽波段的谱。这样一个特征化的 Blazar 谱却包含了非常复杂的物理过程。

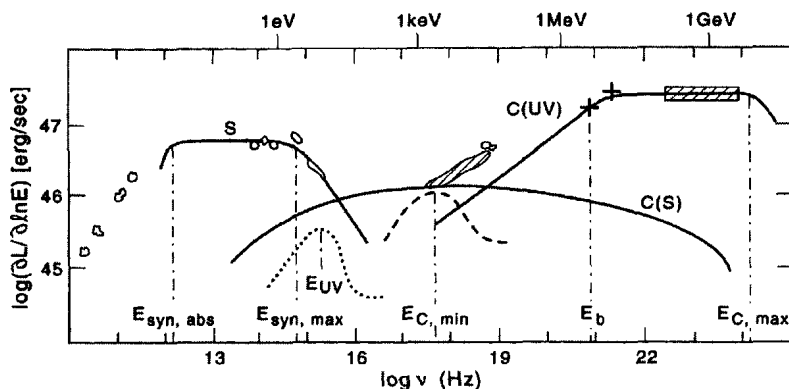


图 1 Blazar 的宽波段能谱

各个波段的起源都有一定的争议,射电起源的争议是比较小的,一般认为是同步辐射。到了红外、光学、紫外、X 射线和 γ 射线,随着能量的增大争议就越大。对更高能量的限制之一是早为人知的 Pair-production,这个限制是 Blandford & Levinson 在 EGRET 上天前就给出的。由于 Pair-production 限制,他们认为喷流的几何尺度是随着能量是一个一一对应的关系。如果甚高能光子要从活动星系核区域出来,那么必须是半径要大于多少以外,这样才可以避免 Pair-production 这个灾难。从图 2 可以分别看到产生 10GeV、1GeV 和 0.1GeV 辐射产生的区域,再往里走是黑洞和吸积盘。如果在某区域产生了 pair,你就看不



到相应的光子。

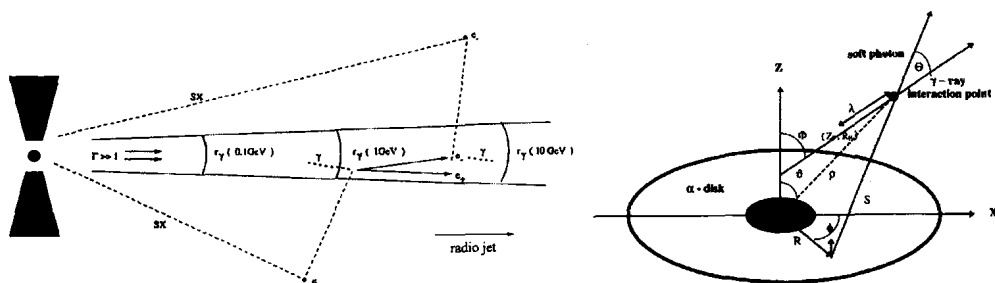


图2 (左)高能辐射产生区域;(右)电子对产生区域示意图

那么在 Blazar 的辐射里面非常关键的问题就是甚高能的东西从哪里来的,我非常感谢白金明前面讲了一些 Blazar 背景的内容,关键是产生 TEV 的这个种子光子哪里来的,这是个非常重要的问题。

Blanford 并没有认真去考虑 AGN 的能量密度、辐射场是怎样随着空间变化的。张力非常仔细考虑了各种吸积盘来产生的辐射场对 TeV 光子的吸收。主要结果告诉我们,如图2(右)所示的几何,当给出黑洞和吸积盘的位置后,TeV 的光源在轴上什么样的位置上所对应的光深是多大,同时是从什么角度上看 TeV 光深的是多大,如图3(左)所示。我们可以看到基本上只是在这个轴对称的轴上逃逸出一些 TeV 的光子,所以非常仔细的结果发现这个 TeV 光子的光

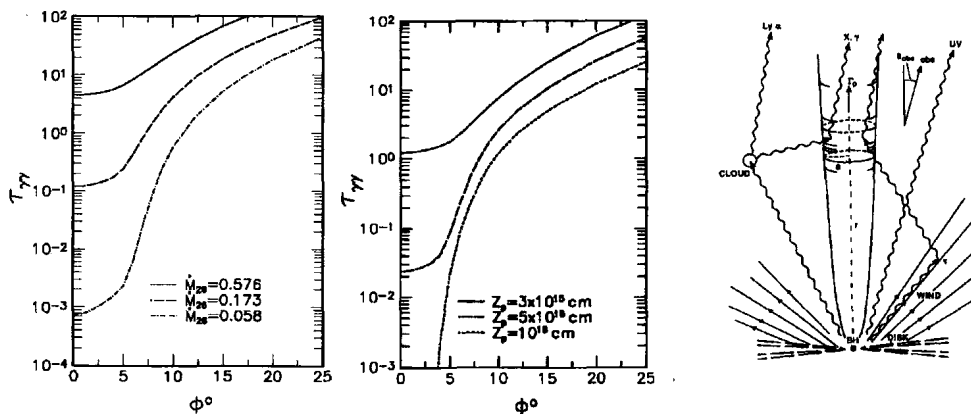


图3 (左):TeV 光子吸收光深与视角关系;(右)种子光子的可能来源



深是非常依赖于观察者的这个视角,发现这个光深实际上对于各种类型的吸积盘,当时计算了包括标准盘,离子加厚盘大概至少是两种的吸积盘作用,发现 TeV 光子要出来还不是那么容易。刚才讲的 TeV 的光子要产生出来是取决于种子光子从哪里出来,如图 3(右)所示,可能来自于吸积盘和宽线区云,不同的起源效率是不一样的,图 4 是进一步细化后的示意图。

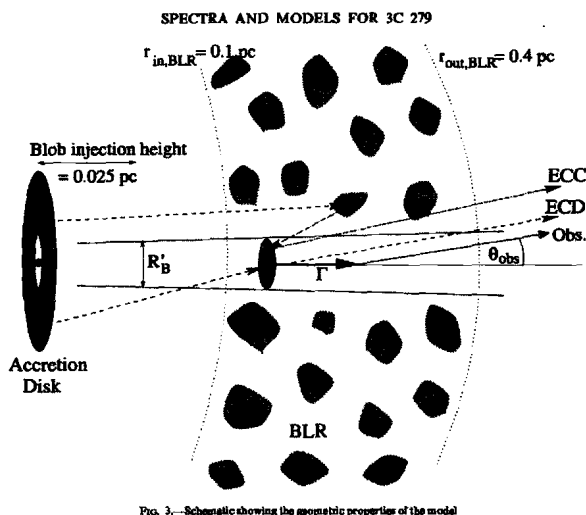


FIG. 3.—Schematic showing the geometric properties of the model

图 4 种子光子的各种可能来源

EGRET 一出来,有两个人马上想到了如果是先锋中的电子去打吸积盘出来的电子,能够产生观测到的 EGRET 的值而且拟合得很好,但是很快就发现,这样的逆康普顿效应其实远远不如宽线区 clouds 反射回来的光子和相对论电子发生逆康普顿作用,这样的效果会更好效应会更高,因为反射回来光子和电子的碰撞是正碰,而打吸积盘的光子是从后面追上去打,所以这个效应是没有正碰显著,所以人们在 Sikorad 这个模型的基础上人们获得很多的 motivation,一个很重要考虑是 Phisellini 和 Madau(1996)做出的。如图 5 所示,他们发现反射回来的最有效的光子既不是吸积盘的光子,也不是宽线区的光子,而是从喷流里反射回喷流的同步光子,这个效率会更高,导致这样的产生的机制,GeV 的辐射机制就变得越来越依赖于 AGN 的具体结构,即观测到的甚高能的辐射不仅仅是喷流这样一个简单的情况,而是系统地反映了整个 AGN 的结构。我个

人觉得,这体现了 AGN 作为一个整体,但是之前实际上很多人都把这个 AGN 的结构就简化成做 Blazar——就是喷流,应该充分认识到这一点。

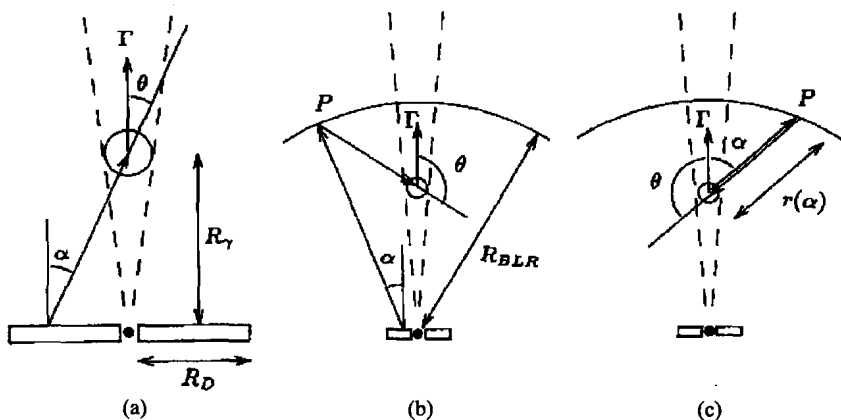


图5 不同种子光子的逆康普顿散射比较

在此基础之上,如果反射回来的同步光子更有效,要避免掉 Pair-production,就会给出一个很强烈的限制,因为反射回来的同步光子要跟逆康普顿产生的光子要作用的话,相对论喷流的运动速度就存在一个上限。因为大于这个时候, Pair-production 就更有效高能光子就根本出不来,故可以给出一个 Doppler 因子的上限。我们知道 Ghisellini 在 1993 年给出了个很有名的利用 SSC 的模型要避免逆康普顿灾难的 Doppler 因子下限,否则将使得同步光子还能产生逆康普顿散射。Pair production 给出了 Doppler 因子上限为

$$\mathcal{D} \leq 8.5 l_{\text{RSC}}^{1/4} \left(\frac{\epsilon_{\text{obs}}}{\text{TeV}} \right)^{-0.175} \left(\frac{\Delta t_{\text{obs}}}{\text{day}} \right)^{-0.25} \left(\frac{v_s}{4.0 \times 10^{14} \text{ Hz}} \right)^{-0.925} \left(\frac{v_{\text{RSC}}}{10^{25} \text{ Hz}} \right)^{0.5}$$

这个 l_{RSC} 的量是观测到的两个峰的比值,我们知道特征化 Blazar 的谱是两个峰的比值,这两个峰的比值大概是多少,严格地说方程的右边是可以由观测给出的而不是依赖于模型。白金明考虑得更多的可能性,把 Pair-production 用到 3C279 里面,要避免宽线区这些弥散的光子产生 Pair-production,他给出了很详细的图,如图 6 所示。

给定这样一个 Pair-production 的限制,起初我们想到,在 M87 这样一个喷流没有正对着观测者的一个 Blazar,那么 Pair-production 要避免是否可以给出

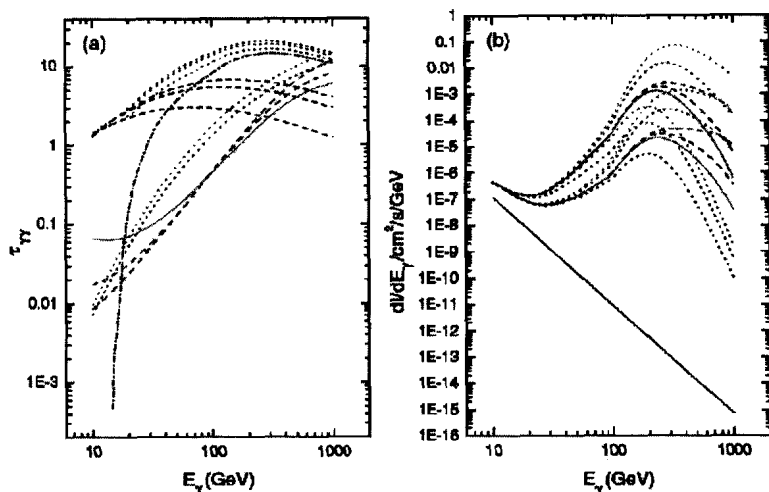


图6 3C 279 的吸收光深

更多的物理呢？这个工作是我与王建成、袁业飞等几个做的，德国的伽玛射线望远镜 HESS，用来探测 TeV 辐射的，他们非常幸运探测到来自 M87 的 TeV 辐射。他们认为这个辐射不是来自喷流。如果 TeV 真的来自于非常靠近黑洞视界的空间，那么光变时标是 2 天，给出辐射区半径下限是 10 个施瓦希半径。如此，那么 Pair-production 给出的空间辐射场的更为严格的限制。

我们知道，M87 的黑洞处于 ADAF 的状态。如果黑洞转和不转，它周围辐射场能量密度的空间分布是不一样的，比较敏感于黑洞自转的。黑洞旋转使得 TeV 光子的光深发生变化。为了获得辐射场能量密度的空间分布，我们拟合 M87 的 SED，得到黑洞的吸积率。黑洞质量测得很确定，哈勃望远镜测出来的黑洞质量 3×10^9 。所以这里唯一不确定的模型就是自转的参数。这里我们用 TeV 作为来探测黑洞视界附近能量密度和辐射场的特征。只要观测给出 TeV 的光变时标，就能够给出黑洞自转下限。利用 HESS 的观测我可以给出 $a = 0.65$ 。（提问：自转的方向有没有关系）那就是另外一个问题了。

以上计算完全基于 Newton 力学，后来我们发现完全广义相对论的计算结果与此基本一致。把这个结果与另一个结果相比。从 eta 方程出发，它描述了黑洞与星系共同演化

$$\eta^{-1} = 1 + \frac{c^2}{U} \left(\frac{dt}{dz} \right) \frac{d}{dz} \left(\frac{\rho^{\text{obs}}}{\delta} \right)$$

这个方程的右边均是直接观测的量。这项是宇宙能量密度,可通过活动星系核的光度函数可以测出;这项是黑洞的质量密度,我们可以从关系中直接测得这个量, δ 是星系特殊数密度之比。我们可以把所有的观测量带到这个方程里面去,得到黑洞在等于红移为 2 的时候,大质量黑洞转动非常快。

当然,这只是一个统计,张双南老师一直在问我这样一个问题,为什么从这个统计里面给出的自转是比较偏慢的,但是我们单独测量的 M87 是比较快的。他们之间是矛盾的还是可以说一个是个体和统计结果的差别来说明。如果将来高能所未来 TeV 辐射地面巡天计划能实施的话,在河外发现一批 TeV 的源,这将对黑洞自转研究将起到非常大的作用,可以从 TeV 的辐射来探测大质量黑洞的自转和周围的辐射场,研究大质量黑洞的宇宙学演化。

白金明:

我觉得你刚才说的 Blandford (1995),一开始能量密度很高,但是从看到伽玛爆辐射的时候,已经是密度很高,所以刚好变得薄,散射小。

张 力:

你画的另外一个图,有没有可能这种宽线区之间相互作用?

王建民:

几乎很少。这个有可能。这个是 2001 年的示意图,扩充了各种反射成分种子光子的作用,去拟合了 3C 279 不同时间的观测,发现拟合结果不错。

宋黎明:

你在做这个 M87 的时候,你的夹角是怎么测的?

王建民:

你说的自转轴之间的加角? 我们假设 TeV 光子跟观测者之间跟自转轴



之间是自由的。

袁业飞：

好像喷流和视界发生的夹角是 30° 。

王建民：

不是。

王建成：

这里面为什么会没有反射？

王建民：

因为这个是高能峰，这个时候的高能辐射的模型是相对论电子和同步反射光子产生的。

卢方军：

你的方程描述了黑洞的自转，现在你们自己有这些方法来测，还有别的方法来测吗？

王建民：

有，pair production，铁线。

徐仁新：

你这个 M87 跟你以前做的还是有一些不一样？

王建民：

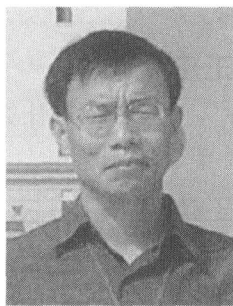
AGN 黑洞的自转角动量来自于并合黑洞的轨道角动量，多次并合会有效改变自转。

专家简介

(以姓氏拼音为序)

白金明

1965 年 11 月出生于江苏南通。博士,中科院云南天文台研究员,博士生导师,2.4 米望远镜主任。2005 年获中科院“百人计划”择优支持。研究领域:活动星系核。发表 SCI 论文 50 余篇,被他人引用 200 余次。主要学术成就包括:长期从事射电噪活动星系核的观测和理论研究,建立了自己的计算 Blazar 能谱分布的模型及其数值模拟程序;在国际上首次研究了探测射电星系核的 TeV 伽玛射线辐射的可能性,预言 M87 和 Cen A 是 TeV 伽玛射线源,对 M87 的预言已得到观测证实。为 FR I 射电星系/蝎虎天体的统一模型提供了证据;证明了大尺度喷流中相对论电子可以加速到很高能,产生同步 X 射线喷流;提出 GPS 类星体的喷流很可能和 Blazar 一样,与视线夹角较小,是特殊的 Blazar。



毕效军

1970 年 3 月出生于河北沧州。博士,现任中科院高能物理研究所副研究员。主持的工作包括国家自然科学基金委面上项目“暗物质理论和探测研究”,“宇宙线传播理论研究”,中科院重要方向性项目子课题“暗物质的探测和理论研究”等。近期主要工作有:ATIC and PAMELA Results on Cosmic $e^+ -$ Excesses and Neutrino Masses; Discriminate different scenarios to account for the PAMELA and ATIC data by synchrotron and IC radiation; Testing Lorentz Invariance with Ultra High Energy Cosmic Ray Spectrum; PAMELA data and leptonically decaying dark matter; Parameters

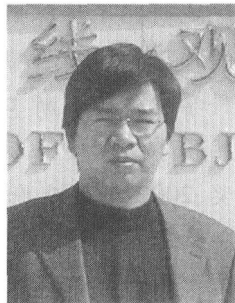




in a class of leptophilic models from PAMELA, ATIC and FERMI.

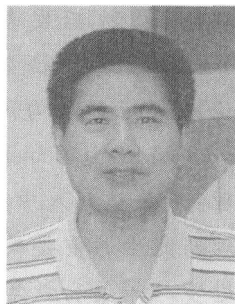
戴本忠

1968年5月出生。教授,博士,云南省高等学校教学、科研带头人。自1993年起一直从事宇宙线天体物理、高能天体物理的教学和科研工作,参与中日AS γ 及中意ARGO国际合作大项目科研课题研究,中意国际合作羊八井ARGO宇宙线实验组云南大学组长,美国Hires宇宙线研究合作组成员,先后承担并按计划完成了3项云南省自然科学基金,主持完成一项国家自然科学基金研究工作,参与多项国家自然科学基金及云南省自然科学基金的研究,在国内外核心学术刊物发表论文30多篇,其中SCI检索论文29篇,论文引用次数超过250篇次,曾获云南省自然科学一等奖2项(合作)、西藏自治区科技进步一等奖1项(合作)。



韩金林

1965年出生于江苏盐城。博士,博士生导师,中国科学院国家天文台致密天体和弥漫介质研究团组的首席研究员。长期从事脉冲星和星际介质的研究工作。主持过国家杰出青年基金、国家自然科学基金项目和国家自然科学基金重点项目。目前正在进行银河系弥漫射电辐射的测量工作和脉冲星辐射的研究工作。在重要国际刊物发表过论文近百篇,被国际同行引用有1000多次。关于银河系磁场的研究工作于2005年获得北京市科学技术奖一等奖,2006年获得国家自然科学基金二等奖。一些研究成果已经进入国际射电天文教科书和脉冲星天文学教科书。



韩占文

1965 年 10 月生。现任中国科学院云南天文台研究员、台长。主要从事双星演化研究和大样本恒星演化研究,系统地研究了特殊恒星的形成、结构、演化及其在天体物理中的作用。1999 年获国家杰出青年基金 1 项,2003 年获中国科学院知识创新工程重要方向项目 1 项,2004 年获国家自然科学基金重点项目 1 项。1998 年获第六届中国青年科技奖,2000 年获政府特殊津贴,2002 年获昆明市十大杰出青年称号、第六届中国科学院杰出青年称号、云南省自然科学一等奖,2003 年入选中国科学院百人计划,2004 年入选首批新世纪百千万人才工程国家级人选。



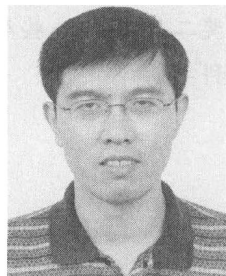
黄润乾

1933 年生。中国科学院院士,云南大学特聘教授。长期从事恒星物理研究,曾经发展和建立了有物质和角动量损失的双星非守恒演化理论;转动双星演化理论;星风激波理论等。先后发表了科研论文 50 余篇,撰写出版“*Stellar Astrophysics*”、《恒星物理》、《恒星大气理论》、《恒星震动力学》和《恒星结构和演化理论》等 5 本专著。其中“*Stellar Astrophysics*”由国际著名的科技出版社 Springer 出版,《恒星物理》专著被列入中科院研究生教材用书,成为我国各高校和研究所培养天体物理研究生的重要教材之一。曾先后获得中国科学院自然科学二等奖、科学技术进步二等奖和教学成果二等奖各 1 项,获得中国天文学会首届张钰哲奖,2007 年度云南省科学技术突出贡献奖。



李向东

1969 年 3 月生于江苏。博士,现为南京大学天文学系教授,博士生导师,中国天文学会秘书长。2000 年获国家杰出青年科学基金:“双星系统中致密星的吸积、爆发与辐射”,参加 2 项国家重点基础研究发展规划“973”项目并担任课题组

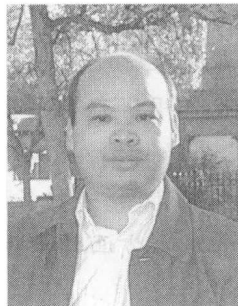




长,主持霍英东教育基金会高校青年教师基金项目“X射线双星的时变特性与吸积盘的研究”。在国际核心学术期刊上发表论文60余篇。1998年获教育部科技进步一等奖,1999年获国家自然科学三等奖。

梁恩维

1967年11月生。博士,现任广西大学物理科学与工程技术学院教授。主要研究领域为伽玛暴及其余辉、伽玛暴宇宙学。已主持完成国家自然科学基金、美国宇航局资助等项目6项。目前主持国家自然科学基金面上项目1项、“973”项目子课题1项(第二承担单位负责人)、广西十百千人才工程项目/广西高校优秀人才支持计划项目/广西大学人才引进等项目。已在ApJ、MNRAS等杂志发表论文70多篇,引起国际同行普遍关注,近5年来引文累计已近1100次,并多次被邀请在国际伽玛暴大会做大会口头报告。



林隽

1964年4月生。中科院云南天文台研究员,国家杰出青年基金获得者。2001年7月开始进入美国哈佛-史密松天体物理中心工作。2001年9月获得物理学博士学位(PhD in Physics)。2005年3月,参加竞聘科学院创新工程云南天文台“太阳爆发与CME研究”首席科学家并获通过,于2005年4月开始正式回国工作。主要研究领域:理论太阳物理,太阳爆发(太阳耀斑、爆发日珥、日冕物质抛射)过程中的等离子体和磁场特征、不稳定性、磁力线重联、解析模型,建立了日冕物质抛射/太阳耀斑的Lin-Forbes模型。



卢方军

1969年3月出生。中国科学院高能物理研究所研究员,粒子天体物理中心副主任,硬X射线调制望远镜(HXMT)卫星有效载荷副总设计师兼项目办公室主任。主要从事高能天体物理观测和实验研究。在X射线卫星观测数据的直接解调成像、超新星遗迹的X射线辐射研究、脉冲星以及脉冲星风云的X射线辐射特性及与周围环境的相互作用研究等方面取得重要成果,发表论文30余篇。发现“牛眼”脉冲星及对其高能辐射性质研究的工作曾被美国NASA作为重要成果发布新闻,并被多国媒体所报道。在HXMT的科学目标论证、载荷研制和工程管理等方面作出重要贡献,获2008年度国务院政府特殊津贴。



彭秋和

1938年9月5日生。南京大学天文系教授,博士生导师。主要致力于核天体物理学(包括高能天体物理)和星系天文学的研究。在核天体物理学领域中,彭秋和研究的课题涉及中子星(脉冲星)、超新星爆发机制、恒星内部的热核反应、星际放射性元素 ^{26}Al 的核合成和天体起源问题以及AGB星内重元素核合成等问题。此外,通过四处奔波与讲学,彭秋和教授为在我国创建和开展核天体物理学的研究,做了大量宣传和学术组织工作。发表学术论文约170篇。



宋黎明

1964年8月出生。研究员,博士生导师。长期从事高能天体物理研究和高能天文卫星的数据分析工作。取得的主要研究成果包括:在 γ 射线脉冲星的研究中,分析了高能光子在脉冲星磁层中的级联过程与脉冲星 γ 射线辐射能谱之间的关系,由此预言了一些新的 γ 射线脉冲星,预言不断被观测证实;系统研究了直接解调成像方法在不同类型探



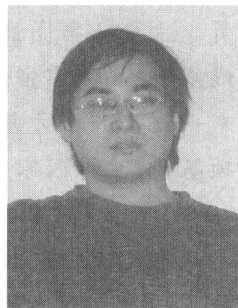


测器观测数据的应用,发展了在 LUCY 迭代中背景控制的一种方法,并与吴枚研究员合作证明了这种方法的收敛性,为这种方法的应用打下了坚实的基础;对非正常 X 射线脉冲星 (AXP) 的研究中,发现超新星遗迹 RX J1838.4 - 0301 中存在一个点源,通过同 ROSAT 卫星数据的对比,发现了这颗 AXP 的一些独特的性质;发现 X 射线双星的光变曲线变化的均方根与流量的关系和双星系统中的动力学过程有关,和双星系统的吸积率也有关系,为研究 X 射线双星的物理过程提供了新的物理量。

目前正在从事 X 射线双星、 γ 射线暴、活动星系核等天体高能辐射性质的研究,共发表研究论文 40 多篇。曾担任“973”项目“天体高能辐射的空间观测与研究”之子课题“空间高能天体物理数据库建设”课题负责人,主持多项国家自然科学基金项目,目前担任国家规划空间项目“空间硬 X 射线调制望远镜 (HXMT)”地面应用系统负责人。

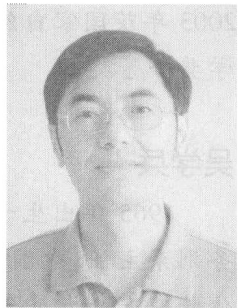
王 成

1982 年出生于安徽泾县,博士,国家天文台副研究员。
研究方向:脉冲星辐射及传播机制,脉冲星高速度起源等。



王建成

1964 年 6 月生。博士生导师,现任中科院云南天文台研究员,副台长。学科方向是理论天体物理,主要从事高能天体的物理过程研究。目前主持国家自然科学基金项目,参加国家重大基础学科研究项目 (“973”项目)、中国科学院知识创新工程项目等工作,在国内外核心刊物发表论文 40 余篇,培养了 3 名博士和 4 名硕士研究生。



王建民

1965 年出生于河北藁城。1999 年入选中国科学院“百人计划”, 2003 年获国家杰出青年基金。曾获德国 A. V. Humboldt 基金, 在 Tuebingen 大学、京都大学、以色列 Tel Aviv 大学工作。目前, 主要研究兴趣集中在: 暗物质吸积与巨型黑洞的形成; 活动星系核统一模型: 结构和演化; 巨型黑洞活动的反馈和与星系形成; 基于海量大样本数据研究黑洞演化及其宇宙学效应等领域。



王祥玉

1974 年 1 月出生于江苏省宝应县。现为南京大学天文系副教授, 美国宇航局 (NASA) Swift 卫星项目科学理论组成员。主要从事高能天体物理方面的理论研究, 包括伽玛射线暴、极高能宇宙线、软伽玛重复暴等的研究。主持教育部新世纪优秀人才基金、主持全国优秀博士学位论文作者专项基金、主持国家自然科学基金青年科学基金, 参加科技部“973”项目、国家自然科学基金创新研究群体项目等。



在国际一流 SCI 刊物上发表论文 30 篇, 论文被国际同行“他引”超过 350 次。2008 年入选教育部“新世纪优秀人才”和江苏省“青蓝工程”中青年学术带头人培养对象, 2004 年获全国百篇优秀博士学位论文奖, 2003 年获国家自然科学基金二等奖, 2002 年获教育部提名国家科学技术奖自然科学奖一等奖。

吴学兵

1965 年出生于湖北。现任北京大学天文学系教授, 常务副系主任, 中国天文学会常务理事及空间天文和高能天体物理专业委员会主任。目前正主持国家“973”天文项目子课题“星系活动与超大质量黑洞形成”, 国家杰出青年科学基金等项目。在黑洞天体物理与活动星系核研究方面发





表 SCI 收录研究论文 60 余篇,在国际上被引用 530 余次。2004 年入选教育部首批新世纪优秀人才支持计划,2005 年获国家杰出青年科学基金。2004 年获教育部自然科学二等奖。

徐仁新

1967 年 4 月出生于江苏高邮。现任北京大学物理学院天文系副系主任。主持“脉冲星内部结构及相关问题的研究”、“脉冲星磁场及有关问题的研究”、“裸奇异星物理及其观测证认”、“各种脉冲星类天体辐射与本质的研究”、“立足于国内的脉冲星观测与理论研究”等国家自然科学基金,参与“天体高能辐射的空间观测与研究”、“黑洞以及其他致密天体物理的研究”等“973”项目;发表 SCI 收录论文 60 余篇,编著《天体物理导论》一部。



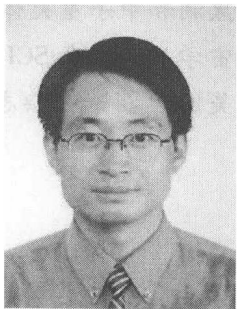
袁为民

1966 年 5 月生。博士,博士生导师,云南天文台首席科学家。1999~2001 年在日本宇宙开发事业团筑波宇宙中心从事博士后研究工作,2001~2004 年在英国剑桥大学天文研究所(IOA)从事博士后研究员工作。2004 年获中国科学院“百人计划”择优支持的海外杰出人才。研究领域:观测天文学、高能天体物理/X 射线天文学、光学天文学。研究方向:活动星系核、星系、黑洞,发表 SCI 论文多篇。



袁业飞

1972 年 8 月出生于安徽省当涂县。现为中国科技大学教授,博士生导师。1999 年获中国科学技术大学天体物理专业博士学位,1998 年获中国科学院院长奖学金优秀奖。2001 年 1 月被破格聘任为中国科学技术大学副教授。2005 年 12 月晋升为教授。现任中国科学技术大学天文与应用



物理系系主任。入选教育部 2005 年度“新世纪优秀人才支持计划”。目前主要承担高年级大学生和研究生的《热力学与统计物理》、《天体物理概论》、《广义相对论》和《相对论天体物理》的教学工作,并从事以相对论天体物理、高能天体物理为主要研究方向的理论天体物理的研究工作。

张 力

1961 年 3 月生。云南省高校特聘教授,博士生导师,教育部跨世纪优秀人才,中科院“百人计划”入选者,国家杰出青年基金获得者。从事致密天体高能物理特性研究,并在该领域(特别是脉冲星高能辐射)做了一系列的工作。主持国家杰出青年基金项目“理论天体物理”,国家自然科学基金天文联合基金重点项目“高能伽玛射线源的多波段观测及理论研究”等国家和省部级科研项目 10 余项。已发表 SCI 科研论文 100 余篇。



张双南

1962 年 12 月出生。现任中国科学院高能物理研究所研究员,中国科学院粒子天体物理重点实验室主任。获国家杰出青年基金资助,“973”计划“黑洞以及其他致密天体物理的研究”首席科学家。2007 年获“赵九章优秀中青年科学奖(空间探测学科)”。2008 年入选教育部长江特聘教授。主要研究领域包括空间天文仪器、天文数据处理方法、黑洞和中子星天体物理、相对论天体物理、伽玛射线暴和宇宙学。共发表 SCI 文章 150 余篇,其中包括以第一作者在英国的《自然》杂志和美国的《科学》杂志上各一篇,总引用超过 3 400 次,H-因子为 30。



部分媒体报道

中科院第 34 期新观点新学说学术沙龙：
假如宇航员掉入黑洞

潘 希

不论是对普通人还是对天文学家来说，“黑洞”一词往往是神秘、巨大能量和难以破解的宇宙现象的代名词。日前，在昆明举办的中国科协第 34 期新观点新学说学术沙龙上，天文学家却通过精确计算认为，虽然物体难以逃离黑洞的吸引，但进入黑洞内部后却永远不会达到引力场的中心。

黑洞是广义相对论预言的一种特别致密的暗天体，黑洞中隐匿着巨大的引力场，因引力场特别强大，以至于包括光子在内的任何物质只能进去而无法逃脱。黑洞理论提出后，物理学家爱因斯坦和霍金都肯定了黑洞的存在，绝大多数科学家都致力于寻找黑洞确切存在的证据来完善黑洞理论。

“黑洞内部引力场的中心研究叫奇点，经过一些计算和推论可以证明，物体进入到黑洞之后，永远到达不了奇点。”中科院高能物理研究所研究员张双南说。

以前的物理和数学研究认为，物体一旦进入黑洞内部，就会立刻到达奇点。张双南解释说：“这个意见和以前截然相反，天体物理学黑洞不是数学黑洞。数学黑洞认为黑洞的点质量在空间没有分布，形成的奇点是黑洞的中心；但天体物理黑洞是在物理黑洞的基础上形成机制的物体黑洞，质量在黑洞内部可以有分布，但是没有任何质量，因此也彻底避免了黑洞的奇点问题。”

正因为对比黑洞的不同研究理论，导致了结论的不同，张双南的研究在得出结果以后，很多人都曾表示难以相信。物理学观点认为，黑洞其实也是个星

球,只不过它的密度极大,靠近它的物体都被它的引力所约束。

“正因为黑洞对光线的强大吸引,导致了其外部与内部时间上的不一致。如果是在黑洞内部观测,可以看到物体在有限的时间内全部掉进了黑洞世界,但在外部观测者眼中,在有限的时间内,不可能到达黑洞的数学奇点,只有宇航员可以看到黑洞并能进入。”张双南说。这就意味着,如果一个宇航员掉入黑洞,他看到自己正在下落,但对于外界的观测者来说,他是永远进不到奇点的。

“也就是说,如果宇航员在太空中进入了黑洞,他是不会受到巨大的引力场作用而被压缩成核物质,他还会继续生存,但也不能逃离黑洞,我们不需要为他举行葬礼。当然,这只是一种比喻。此外,黑洞是否存在球壳也是天文学家正在研究的问题。对于科学家来说,黑洞仍然有很多未解之谜。”张双南说。

《科学时报》(2009年9月4日)

中国科协第 34 期学术沙龙 聚焦高能天体物理中的热点问题： 时变应作为主要的观测研究方向

项煜虹

近日,中国科协第 34 期新观点新学说学术沙龙在云南昆明召开。本次沙龙的主题为“高能天体物理中的热点问题”。与会的 20 多位专家对黑洞、中子星、暗物质等重大问题进行了广泛深入的交流,中科院高能物理研究所研究员卢方军以“时变观测应成为中国高能天体物理观测研究的主要发展方向”作了主题发言。

独辟蹊径研究时变

“选择时变作为主要的观测研究方向可以避免与欧美等国的直接竞争,逐渐建立起我们自己的优势学科。”卢方军指出。时变,即天体发出的电磁辐射随着时间的变化,X 射线时变反映了天体上高能辐射区域物理性质的变化。以国际 X 射线天文台 IXO 为代表的欧美等下一代高能天文卫星的重点是通过大面积的聚焦成像和采用量能器等方法提高点源观测灵敏度和能量分辨率,从而研究早期宇宙形成与演化、暗物质、暗能量以及极端条件下的物理规律等问题。

通过对黑洞和中子星 X 射线双星、邻近的超大质量黑洞系统、伽马射线暴等天体 X 射线流量快速变化的观测,可以研究在黑洞强引力场、中子星强磁场等极端条件下物质的动力学和高能辐射过程等基本物理问题,也可以测量黑洞的自转、探索黑洞的形成与演化以及与星系和恒星的形成与演化的关系。一个太阳质量的黑洞的视界半径为 3000 米,这样的空间尺度对应的光变时标大于 0.01 毫秒,可以通过高精度的时变观测进行研究,而由于黑洞、中子星都相距遥远,这种空间尺度是目前的成像技术所无法分辨的,因此时变观测对于研究极靠近黑洞和中子星的区域具有非常重要的意义。

“我国在 X 射线双星、伽马射线暴等的观测数据分析和理论研究等方面具有国际先进水平,发展了有特色的时变分析手段,同时也拥有较大规模的数据分析和理论研究队伍。”卢方军说。硬 X 射线调制望远镜 HXMT、中法合作天文小卫星 SVOM、载人航天二期空间天文项目 POLAR 等正在研制的空间高能天文项目的实施,也将使我国在时变探测器技术以及相关理论知识积累方面取得长足进步,逐渐发展为一个优势学科方向。

跻身国际先进水平

作为我国第一颗空间天文卫星,硬 X 射线调制望远镜(HXMT)的主要学科目标之一就是测量黑洞、中子星等高能天体的多波段快速光变,研究物质在极端环境下的动力学和高能辐射过程。“这应该成为我国高能天体物理观测研究的主要发展方向。”卢方军表示。

根据国内运载火箭和卫星平台能力,专家提出 X 射线时变和偏振探测卫星 XTP 的概念。XTP 的主要观测仪器是总探测面积达到几平方米的几台准直型 X 射线探测器,覆盖 $1 \sim 30\text{keV}$ (千电子伏) 的能区,同时还计划携带偏振 X 射线望远镜。国际 X 射线天文台 IXO 需要通过掠射成像提高点源观测灵敏度,在 2keV 以上因为效率降低致探测面积迅速下降,XTP 卫星在 2keV 以上的探测面积将比 IXO 高几倍到一个数量级。“研究邻近天体的短时标光变,关键之一就是要通过大的探测面积收集尽可能多的 X 射线光子。XTP 在对邻近天体的多波段 X 射线快速光变,以及对弥散 X 射线辐射的研究能力等方面相比欧美下一代 X 射线望远镜将具有显著优势。”卢方军说道。

“XTP 的科学研究是 HXMT、SVOM、POLAR 等项目科学研究的自然发展。HXMT 发现的各种新天体和天体辐射新现象是 XTP 的主要研究对象;XTP 上的伽马射线暴探测器也是 SVOM、POLAR 等项目的深化。”卢方军解释道。XTP 获得了该领域专家的认可,已列入了我国有关空间科学和天体物理发展战略规划建议之中。“如果现在开始启动预研,超越爱因斯坦计划与宇宙全景计划 XTP 项目可在 2018 年左右上天,整个项目投资估计约 20 亿元左右。”卢方军表示。



超越爱因斯坦计划与宇宙全景计划

2005 年,美国国家航天局(NASA)制订了超越爱因斯坦计划(Beyond Einstein),瞄准宇宙大爆炸、黑洞物理和暗能量等三个重大的科学问题,提出了一系列空间天文项目,其中最重要的 X 射线天文卫星是星座式 X 射线天文台 Con-X。

欧洲空间局(ESA)也制订了新世纪空间科学研究的宇宙全景(Cosmic Vision)计划,其中最主要的 X 射线天文卫星项目是宇宙演化 X 射线谱仪 XEUS(X-ray Evolving Universe Spectrometer)。2008 年 7 月,ESA、NASA 和日本 JAXA 宣布在 XEUS 和 Con-X 的基础上建造 IXO,它将采用焦距大约 20 米的掠射式望远镜系统并携带 5 套科学仪器,主要研究极端物理过程和宇宙的形成及演化,预计在 2021 年左右发射。

《大众科技报》(2009 年 7 月 30 日)

中国科协第34期新观点新学说 学术沙龙在昆举行

熊 燕

为期两天的中国科协第34期新观点新学说学术沙龙,昨日在昆落幕。来自全国相关领域的专家学者围绕“高能天体物理中的热点问题”主题进行了争鸣和讨论。

在天体物理学中,脉冲星研究历来为前沿基础科学和国家战略应用研究所关注,在学术沙龙的讨论中,中科院院士黄润乾研究员等学者从世界最大射电望远镜对中国脉冲星的影响、当今脉冲星研究的现状及未来可能的发展、活动星系核中的黑洞质量估计的系统偏差、毫秒射电脉冲星的新起源等角度发表了个人观点,并开展了热烈友好的辩论。

中国科协新观点新学说学术沙龙是一个百家争鸣的学术探讨平台,其主要目的是充分发挥学术交流作为原始创新源头之一的作用,营造自由进行探究、鼓励学术争鸣、活跃学术思想、促进原始创新的环境,弘扬敢于质疑、勇于创新、宽容失败的精神,为萌芽时期尚未获得学术主流认可的学术思想、理论观点和学术灵感提供一个宽松、自由、平等的交流平台。

《云南日报》(2009年7月19日)

责任编辑：赵 辉
封面设计：照 心
责任印制：安利平

新观点新学说学术沙龙文集 34

中国科协学会学术部编

高能天体物理中的热点问题



ISBN 978-7-5046-5026-9



9 787504 650269 >

定价：18.00 元